



Frederico Sousa Mendes de Reinaldo Gimenez

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Medição de extensões com técnicas de processamento de imagem.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Doutor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco

Coorientador: Doutor Jónatas Miguel de Almeida Valença

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Amarante dos Santos

Arguente: Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia

Vogal: Doutor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho, 2019

Agradecimentos

Esta dissertação é o culminar de toda a minha vida académica e de todo o empenho e dedicação que foram necessários. Gostaria de deixar aqui a minha profunda gratidão a uma série de pessoas sem as quais não teria sido possível este percurso:

- aos meus pais pela educação, esforço e confiança dedicadas, a quem devo tudo;
- ao meu irmão pelo apoio incondicional e presença constante;
- aos meus avós pela confiança depositada e pelo auxílio;
- ao meu orientador Professor Eduardo Cavaco pela partilha de conhecimentos ao longo do curso e pelo apoio na dissertação;
- ao meu coorientador Doutor Jónatas Valença pela ajuda em todas as fases desta dissertação desde a disponibilização do material fotográfico e obtenção das fotografias ao tratamento e análise das imagens;
- ao técnico de laboratório Vitor Silva pela disponibilidade e ajuda durante os ensaios;
- a todos os meus amigos pelo apoio e amizade ao longo do percurso;
- a todos os meus colegas de curso que me ajudaram ao longo do mesmo, sem os quais teriam sido tão mais difíceis os trabalhos e as noites de estudo;
- à Ana pelo carinho e apoio ao longo da dissertação, e pela revisão da mesma.

Resumo

Os métodos tradicionais de medição de extensões em engenharia de estruturas com recurso a transdutores mecânicos ou eléctricos apresentam como principais desvantagens o facto de serem trabalhosos, dispendiosos e limitados ao número de dispositivos disponíveis. Deste modo, é apenas possível obter uma observação discreta da estrutura em causa.

Ao longo dos últimos anos temos assistido ao aumento do uso de técnicas de processamento de imagem para várias aplicações. Entre elas, a medição de extensões em engenharia de estruturas. O objectivo desta tese é o de validar as técnicas de processamento de imagem como ferramenta para medição de extensões exactas e precisas, bem como avaliar os procedimentos, condições, e limites de aplicação das mesmas.

Foram utilizadas e comparadas duas metodologias de processamento de imagem para a medição de extensões: a fotogrametria e a técnica de correlação digital de imagens, sendo que para esta última se utilizou o *software* comercial GOM *Correlate*. Foram medidas extensões médias em provetes de alumínio e PVC durante um ensaio de tracção pura e os resultados foram comparados com os fornecidos pelo extensómetro de uma máquina de tracção universal.

Palavras-chave

Extensão, Medição, Processamento, Correlação Digital de Imagem, Fotogrametria, Precisão, Exactidão.

Abstract

The traditional methods for measuring extensions in structural engineering using electric and mechanic transducers present as main disadvantages the fact that they are labor intensive, expensive, and limited to the number of devices available. Thus, it is only possible to obtain a discrete observation of the structure being studied.

Throughout the last years we have been witnessing an increase of the use of techniques of image processing for multiple applications. Between them, the measurement of extensions in structural engineering. The objective of this thesis is to validate the techniques of image processing as a tool to measure exact and precise extensions, as well as to evaluate the procedures, conditions, and limits for the application of these techniques.

Two methodologies of image processing to measure extensions were utilized and compared: photogrammetry and the technique of digital image correlation, being that for the second one the commercial *software* GOM *Correlate* was used. Average extensions were measured on aluminum and PVC samples during a tensile test and the results were compared with the ones given by the extensometer of the universal testing machine.

Keywords

Extension, Measurement, Processing, Digital Image Correlation, Photogrammetry, Precision, Accuracy

Índice

1 Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	1
1.3 Estrutura da Dissertação	1
2 Estado da Arte	3
2.1 Extensometria Tradicional.....	3
2.2 Técnicas de Processamento de Imagem	3
2.2.1. Fotogrametria	3
2.2.2. Processamento Digital de Imagem.....	4
2.2.3. Correlação Digital de Imagem	5
2.2.4. Parâmetros de Controlo de Qualidade de Resultados	6
3. Metodologia Experimental.....	7
3.1. Ensaio de tracção pura	14
3.2. Preparação dos provetes.....	8
3.3. <i>Set-up</i> de Ensaio	12
3.4. Exactidão das medições	15
3.5. Precisão do método	15
3.6. Variabilidade das medições.....	16
4. Resultados e Discussão	17
4.1. Provede P1	17
4.2. Provede P2	24
4.3. Provede P3	30
4.4. Provede P4	34
5 Conclusão e Desenvolvimentos Futuros	40
5.1. Conclusão	40
5.2. Desenvolvimentos Futuros.....	42
Referências Bibliográficas	44
Anexos	46
Anexo I – Extensões por via das miras, ao nível, exterior e interior, ensaio P1.....	46
Anexo II – Extensões centrais por via das miras, ensaio P1	47
Anexo III – Extensões por via das <i>features</i> , ensaio P1	48

Anexo IV – Extensões por via das miras, ao nível, exterior e interior, ensaio P2	49
Anexo V – Extensões por via das <i>features</i> , ensaio P2	50
Anexo VI – Extensões por via das miras, ao nível exterior e interior por via das miras, ensaio P3.....	51
Anexo VII – Extensões por via das <i>features</i> , ensaio P3	52
Anexo VIII – Extensões por via das miras, ao nível, exterior e interior, ensaio P4	53
Anexo IX – Extensões por via das <i>features</i> , ensaio P4	54

Índice de tabelas

Tabela 1 - Provetes ensaiados.....	7
Tabela 2 - Valores de extensão média registados pelo extensómetro no ensaio ao provete P1.	17
Tabela 3 - Valores dos erros no ensaio ao provete P1.	18
Tabela 4 – Médias das extensões médias Ao Nível (εN), Exteriores (εE) e Interiores (εI) medidas por via das miras no ensaio P1, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	18
Tabela 5 – Médias das extensões médias centrais ($\varepsilon 6$, $\varepsilon 18$, $\varepsilon 30$, $\varepsilon 42$, $\varepsilon 54$, $\varepsilon 66$ e $\varepsilon 78$) medidas por via das miras no ensaio P1, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	21
Tabela 6 – Média das extensões médias obtidas por via das <i>features</i> no ensaio P1 e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	22
Tabela 7 - Valores de extensão média registados pelo extensómetro no ensaio ao provete P2.	25
Tabela 8 - Valores dos erros no ensaio P2.	25
Tabela 9 – Médias das extensões médias Ao Nível (εN), Exteriores (εE) e Interiores (εI) medidas por via das miras no ensaio P2, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	25
Tabela 10 – Média das extensões médias obtidas por via das <i>features</i> no ensaio P2 e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	28
Tabela 11 - Valores de extensão média registados pelo extensómetro no ensaio ao provete P3.	30
Tabela 12 – Valores dos erros no ensaio P3.....	31
Tabela 13 – Médias das extensões médias Ao Nível (εN), Exteriores (εE) e Interiores (εI) medidas por via das miras no ensaio P3, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	31
Tabela 14 – Média das extensões médias obtidas por via das <i>features</i> no ensaio P3 e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	33
Tabela 15 - Valores de extensão média registados pelo extensómetro no ensaio ao provete P3.	35
Tabela 16 – Valores dos erros no ensaio PVC furado.	35
Tabela 17 – Médias das extensões médias Ao Nível (εN), Exteriores (εE) e Interiores (εI) medidas por via das miras no ensaio P4, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	36
Tabela 18 – Média das extensões médias obtidas por via das <i>features</i> no ensaio P4 e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.	38
Tabela 19 - Valores de exactidão e precisão medidos por via das miras e das <i>features</i>	42

Índice de figuras

Figura 1 - Representação esquemática das combinações de resultados precisos e exactos (adaptado de Marques, 2016).	6
Figura 2 – Ilustração exemplificativa de cada um dos tipos de faces (com miras e com features).....	7
Figura 3 - Miras usadas e esquema dos centros das miras identificadas pelo software em cada provete.....	9
Figura 4 – Ilustração da nomenclatura de extensões médias Exteriores (εE), Interiores (εI), Ao Nível (εN) e das miras centrais ($\varepsilon 78$, $\varepsilon 66$, $\varepsilon 54$, $\varepsilon 42$, $\varepsilon 30$, $\varepsilon 18$ e $\varepsilon 6$) no provete de Alumínio.....	9
Figura 5 - Exemplo de preparação de uma face com miras.....	10
Figura 6 - Exemplo de preparação de uma face com <i>features</i>	11
Figura 7 – Exemplo de extensómetros criados no software “GOM” na face das <i>features</i>	11
. Figura 8 - Set-up de ensaio utilizado.....	12
Figura 9 - Aquisições fotográficas dos quatro ensaios.....	13
Figura 10 – Aquisição fotográfica do ensaio ao provete P1.....	17
Figura 11 – Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Ao Nível (εN), Exteriores (εE) e Interiores (εI) para as 115 miras utilizadas no provete P1.....	19
Figura 12 - Comparação de valores entre extensões do extensómetro e as médias Ao Nível, no interior e Exterior pelo método das miras.	20
Figura 13 - Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Centrais, εC , ($\varepsilon 6$, $\varepsilon 18$, $\varepsilon 30$, $\varepsilon 42$, $\varepsilon 54$, $\varepsilon 66$ e $\varepsilon 78$) para as 115 miras utilizadas no provete P1.	21
Figura 14 – Comparação entre os valores das extensões médias das miras Centrais, εC , com as extensões no Interior, εI e com as do extensómetro.	21
Figura 15 – Comparação dos resultados obtidos pelo extensómetro vs método das features.	23
Figura 16 - Comparação dos resultados obtidos pelas miras e pelas features e respectivos coeficientes de variação.....	23
Figura 17 – Aquisição fotográfica do ensaio ao provete P2.	24
Figura 18 – Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Ao Nível (εN), Exteriores (εE) e Interiores (εI) para as 115 miras utilizadas no provete P2.....	26
Figura 19 - Comparação de valores entre extensões do extensómetro e as médias Ao Nível, no interior e Exterior.	27
Figura 20 - Comparação dos resultados obtidos pelo extensómetro vs método das features.	29
Figura 21 - Comparação dos resultados obtidos pelas miras e pelas features e respectivos coeficientes de variação no ensaio ao provete P1.	29
Figura 22 – Aquisição fotográfica do ensaio ao provete P3.	30
Figura 23 – Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Ao Nível (εN), Exteriores (εE) e Interiores (εI) para as 132 miras utilizadas no provete P3.....	31
Figura 24 - Comparação de valores entre extensões do extensómetro e as médias Ao Nível, no interior e Exterior.	32
Figura 25 - Comparação dos resultados obtidos pelo extensómetro vs método das features.	33

Figura 26 - Comparação dos resultados obtidos pelas miras e pelas features e respectivos coeficientes de variação.....	34
Figura 27 – Aquisição fotográfica do ensaio ao provete P4.	35
Figura 28 – Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) para as 126 miras utilizadas no provete P4.	36
Figura 29 - Comparação de valores entre extensões do extensómetro e as médias Ao Nível, no interior e Exterior.	37
Figura 30 - Comparação dos resultados obtidos pelo extensómetro vs método das features.	38
Figura 31 - Comparação dos resultados obtidos pelas miras e pelas features e respectivos coeficientes de variação.....	39

Índice de abreviaturas e símbolos

ε Extensão

ε_N Extensão medida ao nível do extensómetro da máquina

ε_E Extensão medida no exterior do extensómetro

ε_I Extensão medida no interior do extensómetro

ε_C Extensões das miras centrais

ε_6 Extensão das miras centrais com 6mm de afastamento

ε_{18} Extensão das miras centrais com 18mm de afastamento

ε_{30} Extensão das miras centrais com 30mm de afastamento

ε_{42} Extensão das miras centrais com 42mm de afastamento

ε_{54} Extensão das miras centrais com 54mm de afastamento

ε_{66} Extensão das miras centrais com 66mm de afastamento

ε_{78} Extensão das miras centrais com 78mm de afastamento

$\Delta\delta_i$ Variação das coordenadas dos centros das miras de fotografias consecutivas

μ Média Aritmética

σ Desvio Padrão

C_v Coeficiente de Variação

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A medição de extensões em Engenharia Civil está normalmente associada a processos complicados e demorados de preparação dos mecanismos de medição como transdutores e extensómetros eletrónicos ou mecânicos. Os resultados destas medições estão directamente ligados com o número de transdutores disponíveis, resultando numa monitorização restringida à zona que os equipamentos abrangem. Adicionalmente, além do erro intrínseco dos próprios mecanismos (em especial quando há rotura dos provetes, terminando a continuidade física do provete entre os pólos de medição) o uso destes mecanismos pressupõe a sua correta aplicação e calibração, o que está sempre associado a um possível erro adicional, decorrente do erro humano.

O uso de técnicas de processamento de imagem é uma alternativa que permite a monitorização de toda a área de interesse do provete com um processo de aplicação do *setup* simples, rápido e com menos equipamento necessário (Almeida et al., 2015; Valença, 2006).

1.2 Objectivos

O principal objectivo desta dissertação é o de validar o uso das técnicas de processamento de imagem para medir extensões médias até 2% em ensaios laboratoriais.

Em particular, foi também definido como objectivo a definição dos procedimentos requeridos para aplicação das técnicas de processamento de imagem.

Por último propõe-se também efectuar a avaliação dos limites de aplicação dos métodos utilizados a fim de perceber quais as restrições na aplicação dos mesmos.

1.3 Estrutura da Dissertação

A fim de expor de forma clara o estudo concretizado, esta dissertação apresenta-se composta por 5 capítulos:

- Neste primeiro capítulo introdutório, é feito um enquadramento do trabalho, são identificados os objectivos e é explicada a organização da dissertação.
- No segundo capítulo é feita uma introdução à fotogrametria, e expõem-se os conhecimentos adquiridos acerca desta técnica para obtenção dos valores de extensão.

- No terceiro capítulo é definida a metodologia utilizada, é explicada a preparação dos provetes de alumínio e de PVC e todo o *set-up* de ensaio.
- No quarto capítulo os resultados obtidos são analisados e separados em dois grupos: análise dos provetes de alumínio e análise dos provetes de PVC. Sempre que possível, os resultados são comparados com os obtidos pelo extensómetro da prensa como forma de controlo e para reforçar a viabilidade do método.
- No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas dos resultados obtidos e formulados possíveis desenvolvimentos de interesse para a área de Engenharia Civil.

2 Estado da Arte

2.1 Extensometria Tradicional

Para conhecer as extensões ocorridas em determinadas direcções são utilizados extensómetros. Os extensómetros são aparelhos que medem a variação de comprimento entre dois pontos, ao dividir este valor pela distância inicial entre esses pontos é conhecida a extensão.

Existem vários tipos de extensómetros, que se podem classificar de acordo com o princípio de funcionamento (Portela e Silva, 1996):

- Extensómetros mecânicos - através de dispositivos mecânicos, alavancas e engrenagens conectados à base de leitura onde se obtém os deslocamentos relativos das extremidades de medição.
- Extensómetros ópticos - a ampliação do deslocamento relativo das extremidades da base é feita por meios ópticos (espelhos e lentes).
- Extensómetros eléctricos de resistência – baseiam-se na variação da resistência eléctrica de um circuito submetido a uma deformação.
- Extensómetros acústicos - a medição é feita por auscultação do período de vibração de um fio de aço tendido entre dois pontos ligados à base de medida. A auscultação é realizada com recurso a um electro-íman.

2.2 Técnicas de Processamento de Imagem

São apresentadas de seguida as técnicas aplicadas na medição de extensões com técnicas de processamento de imagem. Estas técnicas permitem obter informação acerca dos objetos de estudo possibilitando detetar, identificar e caracterizar geometricamente os mesmos. Estas técnicas são as bases utilizadas para o cálculo das extensões ao longo da dissertação.

2.2.1. Fotogrametria

A palavra *Fotogrametria*, de origem grega, deriva da combinação de três palavras: *photos*, *gramma* e *metron*, que significam luz, descrição e medidas. Existem trabalhos publicados sobre esta técnica desde o início do século XIX que mostram também a história deste método (ASP, 1980; Burtch, n.d.).

A fotogrametria pode ser dividida em diferentes categorias consoante o tipo de fotografias obtidas ou sistemas sensoriais operados. A divisão pode ser feita também em função do posicionamento da câmara: existem então a fotogrametria terrestre e a aérea, conforme as capturas sejam em terra ou a partir de aeronaves, respectivamente. Pode dividir-se em função do meio de captação: fotogrametria,

radargrametria e fotogrametria raio-X consoante sejam utilizados respectivamente fotografia, radar e raio-X (ASP, 1980).

Com a crescente facilidade do acesso aos computadores e máquinas fotográficas digitais, ferramentas necessárias ao emprego da técnica da fotogrametria, esta tem vindo a ganhar um novo interesse devido à sua acessibilidade e rapidez no tempo de execução (Valença, 2006).

Existem várias definições de fotogrametria, das quais são apresentadas as seguintes:

Segundo Berberan (2002), a fotogrametria pode ser definida no sentido lato: a ciência que permite obter informação a partir de registos de radiação eletromagnética; no sentido direto: a ciência que permite obter informação semântica e métrica a partir de fotografias. É a arte, ciência e tecnologia usadas para obter informação fiável, quer métrica quer semântica, acerca de objetos, por meio da medição e interpretação de imagens obtidas através de registos de radiação visível (Berberan, 1985).

Segundo a Sociedade Americana de Fotogrametria a fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obter informação confiável acerca de objetos físicos e sua envolvente através de um processo de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas com base em testes de energia de radiação eletromagnética e outros fenómenos (ASP, 1980).

2.2.2. Processamento Digital de Imagem

O Processamento Digital de Imagem, em inglês *Digital Image Processing* (DIP), é um processo realizado através de um computador, para transformação de uma imagem digital. Esta transformação pode ser feita para realçar/obter certas propriedades de interesse específico, sejam elas menor ruído ou distorção, maior nitidez, entre outras. As técnicas do DIP são aplicadas com base em métodos numéricos que permitem transformar a imagem digital em matrizes bidimensionais finitas (Marques Filho e Vieira Neto, 1999).

O DIP pode ser dividido em três categorias, o baixo, médio e alto nível:

- O baixo nível atua a nível do *pixel* e envolve operações primitivas como pré-processamento de imagem. É caracterizado por ter imagens como objecto inicial e final.
- O médio nível envolve tarefas mais avançadas como segmentação, reconhecimento de objetos e partição de imagem. O objeto inicial é uma imagem e o final pode ser constituído por um conjunto de atributos retirados da imagem inicial, como por exemplo sombras e contornos de objetos.
- O alto nível envolve a interpretação do conteúdo da imagem tentando realizar funções de carácter cognitivo como as associadas à visão humana (Fu et al., 1987; Gonzalez e Woods, 2002; Marques Filho e Vieira Neto, 1999).

Um sistema de processamento digital de imagem comum é normalmente constituído por diferentes elementos com diversas funções: aquisição de dados (câmaras, scanners), armazenamento, (discos,

fitas magnéticas), processamento (computador) e exibição (monitores ou impressão). Estes elementos são utilizados pela seguinte ordem de acontecimentos (Albuquerque e Albuquerque, 2000):

- Condicionamento do ambiente a captar na imagem – ajuste da iluminação entre outros.
- Aquisição de imagem e armazenamento.
- Melhoria da imagem – pré tratamento digital de imagem.
- Segmentação – separação dos objetos do fundo da imagem.
- Parametrização – determinação de grandezas acerca dos objetos: medidas, forma, topologia, entre outros.
- Análise quantitativa – aplicação da ferramenta ao problema em questão, associação de grandezas, correlação espacial ou temporal, análise de sequência de imagens, entre outros.

No caso de deslocamentos no plano é utilizada a homografia, que efectua uma transformação linear que permite relacionar as coordenadas de um ponto real num plano com as suas projecções na imagem. Esta transformação pode ser efectuada através da matriz homografia – matriz de transformação de coordenadas (Criminisi, 2001).

É ainda de frisar que para medir os deslocamentos ocorridos através dos registos fotográficos, é necessário conhecer a resolução espacial. A resolução espacial é a relação entre *pixel* e a medida de comprimento utilizada, neste caso a resolução espacial será então medida em mm/pixel.

2.2.3. Correlação Digital de Imagem

A correlação de imagem digital, em inglês, Digital Image Correlation (DIC), é um método ótico que permite analisar deformações através da comparação de imagens digitais obtidas em diferentes fases. O deslocamento num plano entre fases é determinado através de uma correspondência das imagens.

O método foi criado nos anos 80, e tem sido desenvolvido até aos dias de hoje apresentando alto desempenho. No entanto, esta técnica usa o registo fotográfico pelo que se torna um procedimento moroso. Com o aparecimento do registo em vídeo e mais recentemente o vídeo digital, os métodos óticos vieram a ganhar uma flexibilidade maior ao permitir simplificar e acelerar o processo (Chousal e de Moura, 2007). A deformação é calculada através da comparação das coordenadas não só de um ponto em imagens consecutivas como de um conjunto de pontos na sua vizinhança.

2.2.4. Parâmetros de Controlo de Qualidade de Resultados.

Nesta dissertação os valores obtidos serão comparados com os valores considerados padrão, que neste caso são obtidos através de um extensómetro. Estes valores são definidos como padrão, uma vez que o extensómetro utilizado cumpre as normas europeias estipuladas para estas medições (Zwick/Roell, 2019). A fim de avaliar a qualidade desses valores, serão aplicados dois parâmetros distintos: exactidão e precisão.

A exactidão é avaliada através do erro relativo. Este valor traduz a diferença relativa do valor medido face ao valor padrão, em percentagem. É assim possível avaliar o grau de exactidão da medição face aos valores de controlo.

A precisão é avaliada através do coeficiente de variação. Este valor traduz a uniformidade das medições, a fim de perceber se estas são semelhantes entre si, ou se por outro lado existe uma grande dispersão dos resultados. É assim possível avaliar a precisão dos resultados ao estudar a variabilidade dos resultados face à sua média.

Conclui-se assim que os resultados desejados são aqueles que apresentam elevada exactidão e precisão (Figura 1). Resultados ideais cujos valores medidos apresentam erros relativos diminutos em relação aos de controlo e ainda, que os medidos apresentem uma dispersão também diminuta entre si, com um baixo grau de variabilidade (Marques, 2016; Valença, 2006).

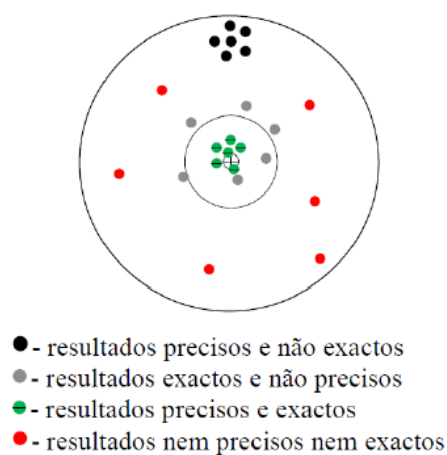


Figura 1 - Representação esquemática das combinações de resultados precisos e exactos (adaptado de Marques, 2016).

3. Metodologia Experimental

Este capítulo aborda todo o procedimento experimental desenvolvido ao longo desta dissertação. É descrita a metodologia de ensaio adoptada, o processo de preparação dos provetes, o *set-up* de ensaio, a análise da exactidão das medições, a análise da precisão do método e a análise da variabilidade das medições.

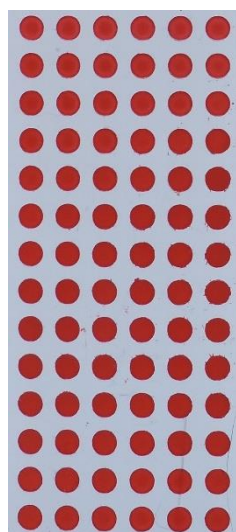
3.1. Provetes ensaiados

Foram ensaiados quatro provetes, P1 a P4, cujos materiais e dimensões estão apresentados na Tabela 1.

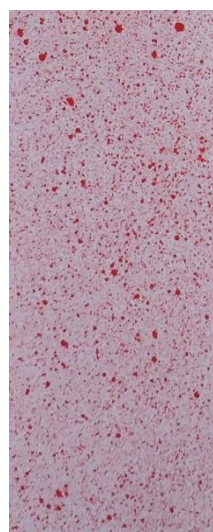
Tabela 1 - Provetes ensaiados

Proвете	Material	Comprimento mm	Largura mm	Espessura mm	Diâmetro do furo mm
P1	Alumínio	250	29,5	2	-
P2	Alumínio	250	29,5	2	15
P3	PVC	250	39	1	-
P4	PVC	250	39	1	18

Todos os provetes foram pintados em ambas as faces de duas formas distintas através de tinta em *spray*. Uma das faces é designada por face das miras e a outra por face das *features* como ilustrado na Figura 2.



(a) Exemplo de uma face com miras.



(b) Exemplo de uma face com *features*.

Figura 2 – Ilustração exemplificativa de cada um dos tipos de faces (com miras e com *features*).

Cada provete foi sujeito ao ensaio de tracção e analisado em simultâneo por via dos dois métodos já referidos: através das miras e das *features*. Em simultâneo, foram registadas as extensões com recurso ao extensómetro da máquina de tracção universal como termo de comparação.

As miras utilizadas e as miras identificadas pelo *software* estão representadas e numeradas na Figura 3. Nestas fotografias verifica-se que as miras se encontram dispostas numa grelha com 5 colunas nos provetes de alumínio e 6 colunas nos provetes de PVC. É de evidenciar que o dispositivo de medição do extensómetro da máquina cobre algumas miras.

É ainda de frisar, como se pode ver na Figura 3, que ao longo de toda a dissertação, a numeração das linhas começa em 1, e é crescente de cima para baixo. E ainda, que a numeração das colunas começa também em 1, e é crescente da esquerda para a direita.

Optou-se por calcular as extensões que fossem mais diretamente comparáveis com as que foram medidas pelo extensómetro. Por exemplo, no caso do provete P4, uma vez que o extensómetro foi colocado ao nível da 3ª e 20ª linha, foram medidas as extensões entre miras disponíveis nessas mesmas linhas: entre as miras 3 e 20, da primeira coluna, e as miras 24 e 41, da segunda coluna. Este grupo de medições foi designado de extensões “Ao Nível” (ε_N) (do extensómetro). Em adição a este grupo, foram ainda medidos mais dois grupos de extensões: entre a 2ª e 21ª linha e entre a 4ª e 19ª linha. Estes dois grupos foram designados respectivamente por “Exteriores” (ε_E) e “Interiores” (ε_I), (ao extensómetro), conforme ilustrado na Figura 4. Como nestes dois últimos grupos nenhuma mira foi coberta por parte do dispositivo de medição do extensómetro, foi então possível calcular as extensões em todas as 6 colunas das linhas já referidas. Este processo foi adotado para todos os ensaios, adaptando apenas as miras consoante as linhas tapadas pelo extensómetro em cada caso.

Em adição, apenas no provete de Alumínio, foi feito um estudo com as miras centrais do mesmo, a fim de determinar o comportamento do método para distâncias entre miras inferiores às que foram até agora analisadas. Para isso foram então calculadas as extensões entre as miras de todas as cinco colunas para o seguimento dos pares de linhas interiores às até agora analisadas. Crescentemente interiores às linhas 4-19, são as linhas 5-18, 6-17, 7-16, 8-15, 9-14, 10-13, e 11-12, originando respectivamente as extensões ε_{78} , ε_{66} , ε_{54} , ε_{42} , ε_{30} , ε_{18} e ε_6 de distâncias L_0 decrescentes como indicado pela nomenclatura, e ilustrado na Figura 4. Este estudo foi feito a fim de aferir a partir de que distâncias entre miras o método funciona com bons resultados.

3.2. Preparação dos provetes

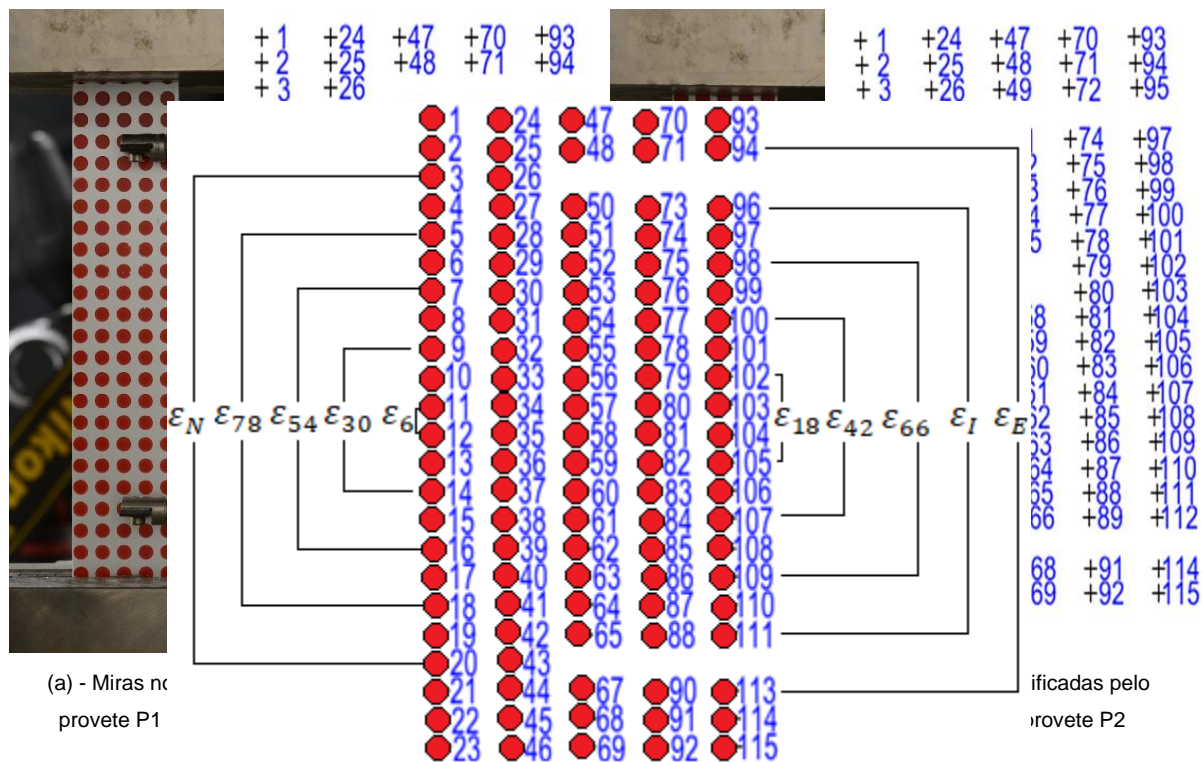


Figura 4 – Ilustração da nomenclatura de extensões médias Exteriores (ϵ_E), Interiores (ϵ_I), Ao Nível (ϵ_N) e

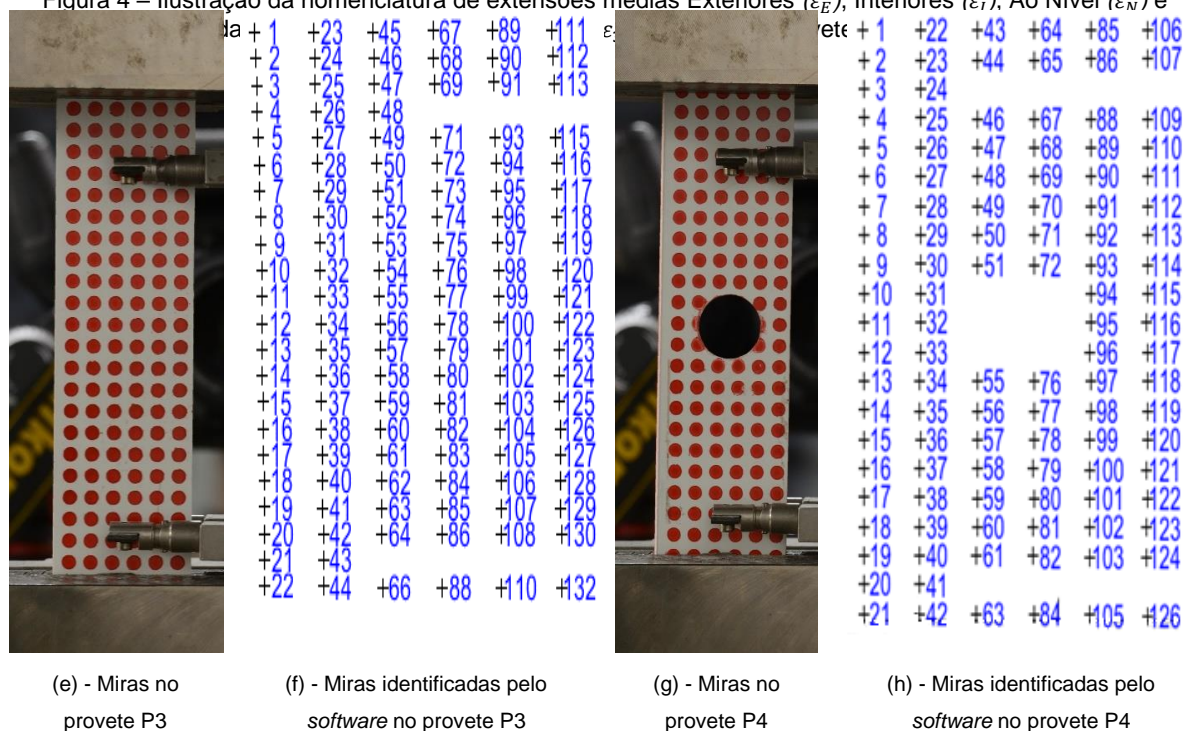
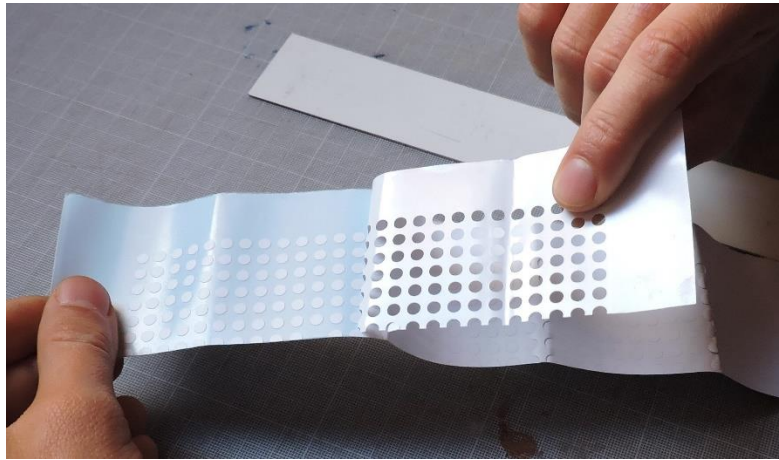


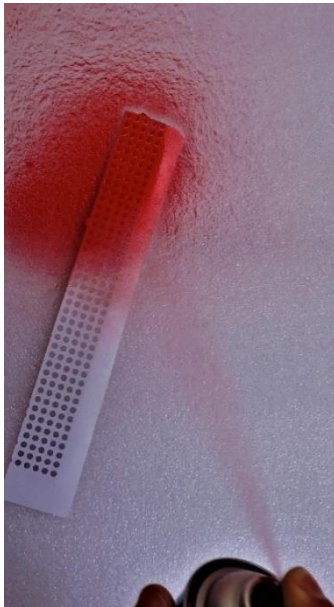
Figura 3 - Miras usadas e esquema dos centros das miras identificadas pelo *software* em cada provete.

Como referido anteriormente, as faces das miras foram pintadas com uma malha quadrangular de miras circulares de 6mm de diâmetro e centros afastados de 6,05mm. Para isso foi utilizada uma máquina de recorte de autocolantes de vinil com a malha especificada. São então colados os autocolantes nos provetes, que funcionam como negativos: ao pintar por cima do autocolante, no provete são pintadas

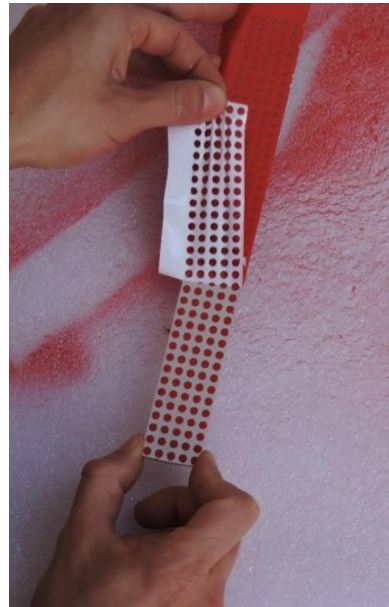
apenas as miras circulares. Ao retirar os autocolantes dos provetes, estes ficam então preparados com a malha desejada pintada (Figura 5). Esta técnica de pintura é designada por *stencil*. Para a pintura desta face foi utilizada uma tinta em *spray* de cor vermelha, direccionado directamente ao provete.



(a) - Preparação do autocolante.



(b) - Pintura do provete com autocolante aplicado



(c) - Remoção de autocolante do provete pintado.

Figura 5 - Exemplo de preparação de uma face com miras

A face das *features* foi pintada com uma nuvem de pontos criada aleatoriamente com recurso ao *spray*. A pintura foi feita de forma a que as partículas de tinta caíssem sobre o provete em detrimento de serem projectadas sobre o mesmo. O objectivo foi pulverizar, carregando levemente no *spray*, por cima do provete por forma a permitir que as partículas de tinta fossem mais grosseiras e afastadas, criando uma nuvem de pontos em vez de uma camada de tinta uniformemente espalhada como se pode ver na Figura 6. Para este fim foram utilizados *sprays* de cor vermelha, verde e amarela para estas faces. O uso de diferentes cores permite um maior número de *features* identificados pelo *software*.



Figura 6 - Exemplo de preparação de uma face com *features*.

Para efeitos de comparação, nos provetes P1 e P2 foram criados 5 extensómetros virtuais no software, em cima das respectivas colunas, permitindo comparar com as extensões no Interior obtidas através das miras, como ilustrado na Figura 7. Estes extensómetros foram criados com uma distância inicial L_0 de 90mm. No caso dos provetes P3 e P4, que têm 6 colunas, foram criados 6 extensómetros virtuais.

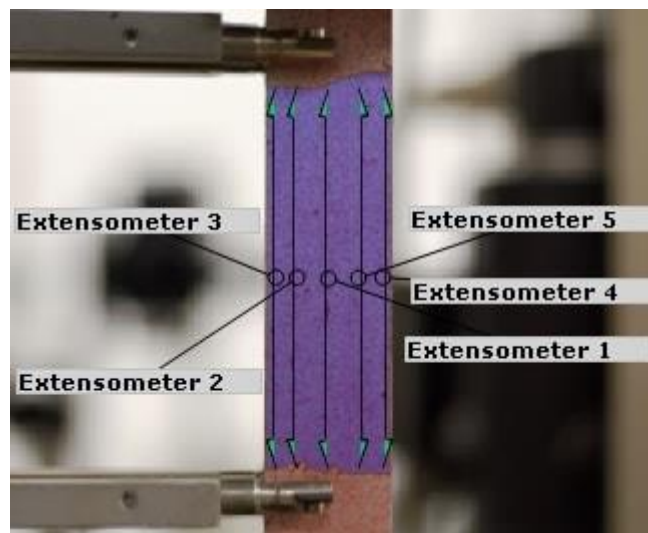


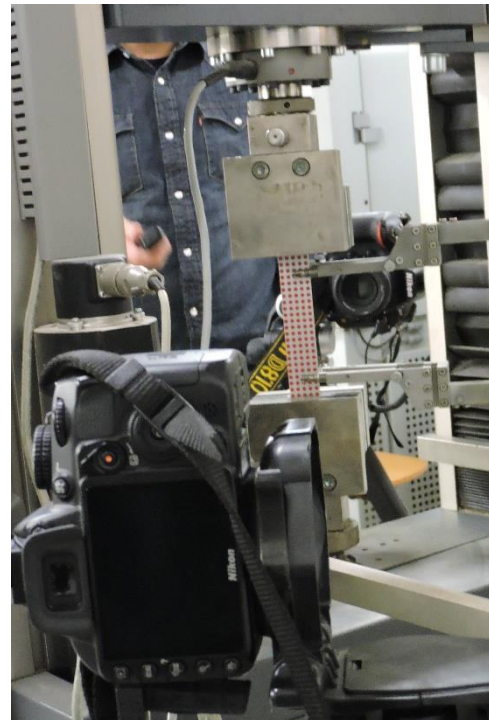
Figura 7 – Exemplo de extensómetros criados no software “GOM” na face das *features*

3.3. Set-up de Ensaio

Os provetes foram colocados na vertical, presos pelas garras da prensa, as quais foram devidamente apertadas a fim de evitar o escorregamento dos provetes ensaiados. Os ensaios consistiram na imposição de forças verticais no sentido ascendente, sendo que a garra inferior se manteve imóvel, e a superior impôs os deslocamentos. A apontar para cada uma das faces do provete ficaram duas câmaras imóveis apoiadas em tripés. As câmaras foram emparelhadas com um dispositivo de sincronização e disparo controlado por rádio-frequência, para poderem tirar fotografias em simultâneo. A Figura 8 ilustra o *set-up* utilizado nos ensaios.



(a) *Set-up* de ensaio visto do lado das *features*.



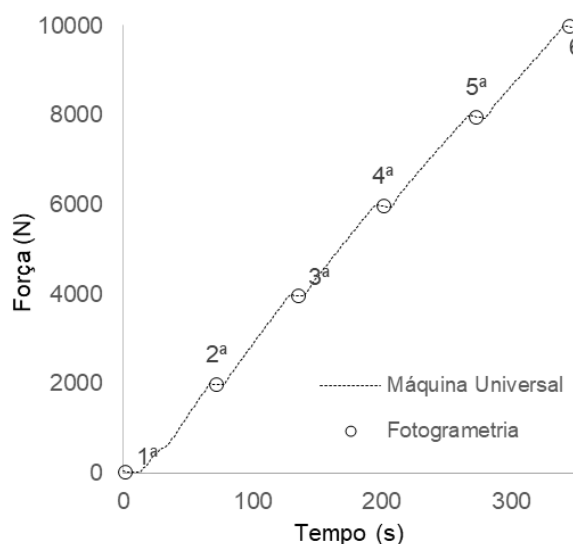
(b) *Set-up* de ensaio visto do lado das miras.

. Figura 8 - *Set-up* de ensaio utilizado.

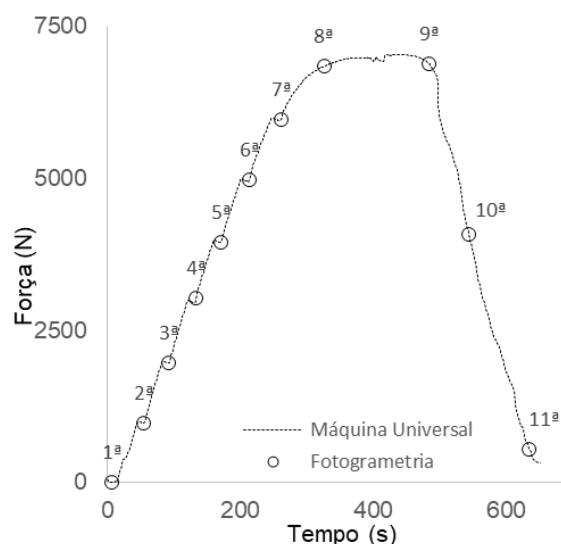
O ensaio de tracção foi efectuado por imposição de deslocamento, tendo-se definido patamares de deslocamento constante para aquisição fotográfica dos provetes. Estes intervalos de tempo, ou patamares, têm o objectivo de estabilizar as tensões instaladas nos provetes, para então serem captadas as fotografias nesses momentos:

- No ensaio do provete P1 foram definidos 6 patamares de 10 segundos a cada 2000 Newton.
- No ensaio do provete P2 foram definidos patamares de 10 segundos a cada 1000 Newton.
- No ensaio do provete P3 foram definidos patamares de 5 segundos nos 100, 200 e a cada acréscimo de 200 Newton seguintes.
- No ensaio do provete P4 foram definidos patamares de 5 segundos a cada 50 Newton.

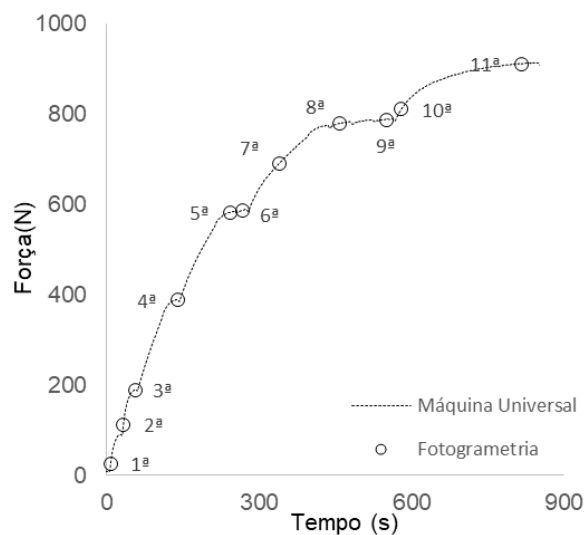
Nos gráficos da Figura 9, é possível ver a aquisição de dados da força exercida pela máquina universal ao longo do tempo, assim como o momento de cada fotografia ao longo do ensaio e a força respectiva, para cada um dos 4 ensaios efetuados.



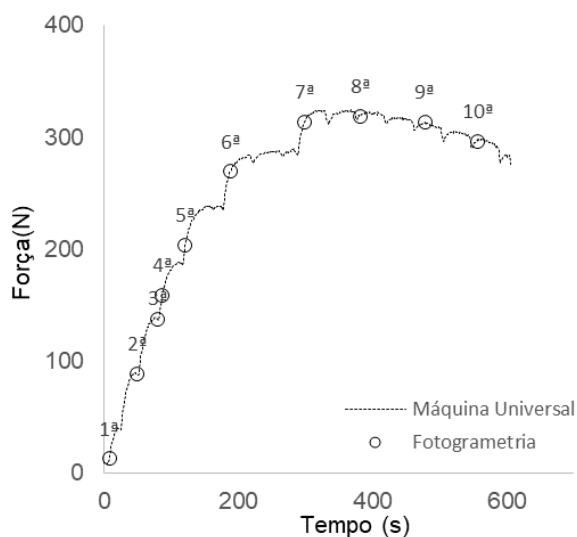
(a) - Aquisição fotográfica do ensaio P1



(b) Aquisição fotográfica do ensaio P2



(c) - Aquisição fotográfica do ensaio P3



(d) - Aquisição fotográfica do ensaio P4

Figura 9 - Aquisições fotográficas dos quatro ensaios

3.4. Ensaio de tracção pura

O objetivo deste ensaio é a validação das técnicas de processamento de imagem para medição de extensões médias. Para isso, foi utilizada uma prensa hidráulica, máquina universal do fabricante Zwick/Roell, modelo Z050, para ensaiar provetes à tracção pura, monitorizados pelo extensómetro da própria máquina, como forma de comparação de resultados. O extensómetro utilizado, do mesmo fabricante, tem um erro associado de $\pm 1\mu\text{m}$ ($0,001\text{mm}$) em medições de variação de comprimento numa faixa de valores entre $20\mu\text{m}$ ($0,02\text{mm}$) e $200\mu\text{m}$ ($0,2\text{mm}$).

O extensómetro foi colocado nos provetes com uma distância inicial entre garras (L_0) de 100mm , pelo que a medição das extensões é quase direta, uma vez que os resultados do aparelho são dados em função do afastamento das garras (ΔL) em milímetros. A extensão (1) é então obtida dividindo o afastamento pela distância inicial.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

Sendo $L_0 = 100\text{mm}$ e ΔL igual ao afastamento em cada instante registado pelo extensómetro (em milímetros), basta então dividir ΔL por 100, obtendo diretamente a extensão ε para qualquer momento do ensaio. Assim, com o extensómetro utilizado para medições com $L_0 = 100\text{mm}$ em variações de comprimento de $20\mu\text{m}$, o erro é de 5% do valor medido (2). Para variações de comprimento (ΔL) de $200\mu\text{m}$, o erro é de 0,5% do valor medido (3).

$$20\mu\text{m}: \quad \varepsilon = \frac{0,02\text{mm} \pm 0,001\text{mm}}{100\text{mm}} * 100\% = 0,02\% \pm 0,001\%, \quad \frac{0,001\%}{0,02\%} * 100\% = 5\% \quad (2)$$

$$200\mu\text{m}: \quad \varepsilon = \frac{0,2\text{mm} \pm 0,001\text{mm}}{100\text{mm}} * 100\% = 0,2\% \pm 0,001\%, \quad \frac{0,001\%}{0,2\%} * 100\% = 0,5\% \quad (3)$$

Para medição das extensões através da fotogrametria foram necessárias algumas preparações dos provetes ensaiados. Neste caso, as miras são compostas por círculos de 6mm de diâmetro, centros afastados de $6,05\text{mm}$ dispostas numa malha quadrangular pintadas nos provetes.

As *features* (características) são detalhes intrínsecos do objeto de estudo detectáveis nas fotografias.

A obtenção das extensões através da fotogrametria foi feita com recurso a dois métodos:

- Por via de miras.
- Por via de *features* (características).

Por via de miras, foi utilizada uma rotina de *Matlab* desenvolvida por Valença (2006). Essa rotina identifica os centros das miras e regista as coordenadas de cada uma delas em cada fotografia. Assim

é possível ver os deslocamentos de cada mira entre cada fotografia consecutiva e calcular assim as extensões.

Por via das *features*, foi utilizada a versão livre de um *software* comercial - *GOM Correlate*. Este *software* permite identificar as *features* dos provetes. À semelhança da rotina de *Matlab* utilizada para as miras, este *software* regista os deslocamentos de cada *features* entre fotografias consecutivas, permitindo assim calcular as extensões. Neste caso, para facilitar essa detecção e aumentar o número de *features*, foram pintadas nuvens de pontos nos provetes.

Estas duas vias apresentam vantagens e desvantagens. Por via das miras existe a vantagem de ser possível ter a certeza absoluta de que as miras estão a ser corretamente identificadas entre fotografias consecutivas, bastando para isso a confirmação visual. O mesmo não pode ser feito por via das *features*, uma vez que se tratam de pontos minúsculos comparativamente às miras de 6mm de diâmetro, e num número muito superior dado que se trata de uma nuvem de pontos. Por outro lado, através das miras, o número de coordenadas detectadas é no máximo igual ao número de miras usadas. Enquanto que com as *features*, esse número é facilmente superado, uma vez que a nuvem de pontos permite a identificação de um número de pontos pelo *software* muito superior. Gera-se assim uma nuvem de pontos de coordenadas conhecidas mais densa. Esta vantagem das *features*, no entanto, pode trazer erros de cálculo associados, uma vez que, como referido anteriormente, não é possível garantir que todos os pontos identificados numa fotografia correspondem na totalidade aos identificados na fotografia seguinte.

3.5. Exactidão das medições

A exactidão do método foi determinada experimentalmente através do cálculo do erro relativo (4) das medições face aos resultados de controlo – os medidos pelo extensómetro. Este conceito traduz a diferença relativa entre valores em percentagem. Quanto menor for o valor do erro relativo, mais exacto é o resultado. É de frisar que os valores de controlo foram medidos pelo extensómetro referido anteriormente no subcapítulo 3.1. Ensaio de Tracção pura, e que o mesmo tem um erro de medição associado, pelo que os valores de controlo são estimativas dos valores de extensões efectivamente instaladas.

$$erro_{relativo} = \frac{|Valor_{medido} - Valor_{controlo}|}{Valor_{controlo}} * 100 \quad (4)$$

3.6. Precisão do método

A precisão do método foi determinada experimentalmente, analisando as 10 fotografias iniciais antes de serem impostas a forças através do cálculo do erro quadrático médio RMS (5) em pixel (*Root Mean Square*). Este valor, que deriva das diferenças das coordenadas entre os centros das miras (Valença,

2006), é a raiz quadrada da média aritmética do quadrado desses valores. A precisão do método é tanto maior quanto menor for o valor de RMS.

$$erro\ RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i^2} = \sqrt{\frac{\Delta\delta_1^2 + \Delta\delta_2^2 + \dots + \Delta\delta_N^2}{N}} \quad (5)$$

Sendo N o número de fotografias analisadas e $\Delta\delta_i^2$ a variação das coordenadas dos centros das miras dessas mesmas fotografias. Este valor RMS, em *pixel*, ao ser multiplicado pela resolução espacial, em mm/*pixel*, origina o valor do erro do método em mm para medição de variações de comprimento. Assim, a fim de calcular o erro do método para medições de extensões, basta dividir o erro das variações de comprimento pelo comprimento inicial das extensões medidas, obtendo um erro adimensional (mm/mm) tal como a própria extensão.

3.7. Variabilidade das medições

A variabilidade das medições foi calculada através do coeficiente de variação (6), C_v , que é a divisão do desvio padrão (7), σ , pela média aritmética (8), μ , de uma amostra de medições, (neste caso de extensões médias). Quanto menor o valor do coeficiente de variação, melhores são as medições do ponto de vista da precisão uma vez que traduz medições com baixo grau de dispersão.

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N x_i \quad (8)$$

4. Resultados e Discussão

4.1. Provete P1

Neste ensaio, foram medidas extensões médias no intervalo compreendido entre 0,046% e 0,288%. Estas medições foram feitas com recurso a 6 fotografias que foram tiradas nos 6 patamares ilustrados na Figura 10. No primeiro patamar, a fotografia respectiva serviu para definir a distância inicial, L_0 , entre miras. Assim, foi possível fazer medições apenas nos últimos 5 patamares, possibilitando então o cálculo das extensões médias comparando as 5 últimas fotografias com a primeira.

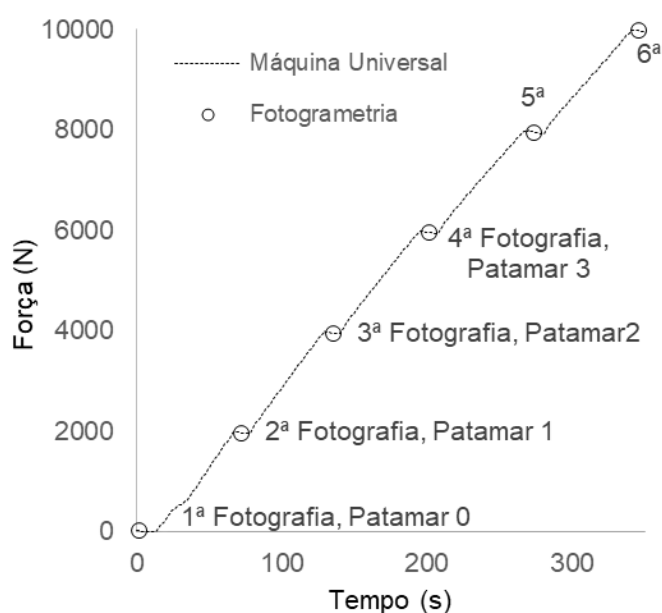


Figura 10 – Aquisição fotográfica do ensaio ao provete P1.

Para melhor compreensão, optou-se por definir o patamar da segunda fotografia como o Patamar 1, que é o primeiro patamar onde se mediram extensões médias. De forma análoga, o patamar da terceira fotografia foi definido como Patamar 2 e assim sucessivamente até ao Patamar 5, que corresponde à sexta fotografia. Os valores medidos pelo extensómetro, que serão usados como termo de comparação com as técnicas de processamento de imagem, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de extensão média registados pelo extensómetro no ensaio ao provete P1.

	Extensão média (%) nos Patamares				
	1	2	3	4	5
Extensómetro	0,048	0,098	0,153	0,215	0,276

O erro RMS foi calculado através de dez fotografias anteriores ao início do ensaio, com recurso ao procedimento explicado no capítulo anterior (subcapítulo 3.4). Foi obtido neste ensaio o valor de RMS de 0,170 pixel. Multiplicando este valor pelo valor de resolução espacial (0,075 mm/pixel), foi obtido o erro em milímetros para medições de distâncias com o valor de 0,013 mm. Para obter o valor do erro para medições de extensões foi então necessário dividir o valor do erro das distâncias pelo valor das distâncias iniciais, ou L_0 , para cada extensão (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores dos erros no ensaio ao provete P1.

RMS (pixel)	Erro (mm)	Erro Extensão		
		Interior (%) L0=90,75mm	Ao Nível (%) L0=102,85mm	Exterior (%) L0=114,95mm
0,170	0,013	0,014	0,012	0,011

Como se pode verificar na Tabela 3, o erro da extensão diminui com o aumento da distância inicial L_0 . De seguida, na Tabela 4, estão apresentadas as médias das extensões médias medidas nas diferentes colunas para os três grupos de medição - Ao Nível (ε_N), Exterior (ε_E) e Interior (ε_I) medidas por via das miras neste ensaio.

Tabela 4 – Médias das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) medidas por via das miras no ensaio P1, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

	Média das Extensões médias (%) nos Patamares					Erro Relativo (%) nos Patamares					Coeficiente de Variação nos Patamares				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
ε_N	0,051	0,093	0,153	0,201	0,272	6,032	4,487	0,403	6,167	1,669	0,099	0,013	0,047	0,073	0,011
ε_E	0,046	0,101	0,159	0,211	0,278	4,558	3,950	4,046	1,854	0,439	0,332	0,130	0,126	0,087	0,058
ε_I	0,063	0,095	0,160	0,218	0,288	30,233	2,342	4,361	1,797	4,216	0,610	0,166	0,162	0,104	0,048

+1	+24	+47	+70	+93
+2	+25	+48	+71	+94
+3	+26			
+4	+27	+50	+73	+96
+5	+28	+51	+74	+97
+6	+29	+52	+75	+98
+7	+30	+53	+76	+99
+8	+31	+54	+77	+100
+9	+32	+55	+78	+101
+10	+33	+56	+79	+102
+11	+34	+57	+80	+103
+12	+35	+58	+81	+104
+13	+36	+59	+82	+105
+14	+37	+60	+83	+106
+15	+38	+61	+84	+107
+16	+39	+62	+85	+108
+17	+40	+63	+86	+109
+18	+41	+64	+87	+110
+19	+42	+65	+88	+111
+20	+43			
+21	+44	+67	+90	+113
+22	+45	+68	+91	+114
+23	+46	+69	+92	+115

ε_I ε_N ε_E

Figura 11 – Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) para as 115 miras utilizadas no provete P1.

Como se pode verificar na Tabela 4, o domínio de extensões estudado é inferior a 0,3%. Estas extensões situam-se dentro do limite elástico dos aços estruturais (Lúcio, 2006). Os valores do erro relativo em relação ao extensómetro não divergiram mais do que 6% dos registados pelo extensómetro, à excepção da medição ε_I no primeiro patamar. O método apresenta por isso uma exactidão de cerca de 94% ao ser considerada a medida fornecida pelo extensómetro como referência. O valor do erro ε_I no primeiro patamar, 30%, deve-se a um provável erro de medição na coluna 1, que apresenta uma extensão negativa, o que influencia a média e por conseguinte o erro.

As medições ao Nível, ε_N , apresentam os melhores resultados de coeficiente de variação, sempre inferiores às restantes medições. É ainda possível ver que tanto o erro relativo como os coeficientes de variação apresentam piores resultados no primeiro patamar, onde a extensão é da ordem dos 0,05%. No Anexo I são apresentadas todas as extensões medidas e os desvios padrão respectivos.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos, os valores das extensões médias obtidos pelas miras (ε_N , ε_E e ε_I) foram introduzidos nos gráficos da Figura 12, que comparam os valores de cada um dos grupos de medição de extensão com os valores do extensómetro. Estes gráficos mostram ainda a envolvente do erro nas medições, que é a faixa admissível para valores exactos segundo este método, bem como os valores do coeficiente de variação das medições por via das miras. Nas abcissas foram introduzidos os valores de cada grupo, e nas ordenadas os valores do extensómetro. Se os pontos gerados coincidirem com a bissectriz, significa então que os valores das medições das extensões médias são iguais aos registados pelo extensómetro. Ao longo da bissectriz encontram-se ainda as linhas de envolvente do erro do próprio extensómetro segundo o fabricante (Zwick/Roell, 2019).

Verificou-se que no geral as medições pelos dois métodos (miras e extensómetro) foram semelhantes, com maior dispersão (coeficiente de variação), no primeiro patamar que tende a baixar muito nos patamares seguintes. Relativamente aos grupos de extensões medidas, (Ao Nível, Exterior e Interior), a dispersão entre eles é maior no primeiro e dois últimos patamares, sendo menor nas extensões de ordem de 0,1% e 0,15%.

Como referido anteriormente, foi realizado um estudo no provete de alumínio a fim de aferir o comportamento do método para miras a distâncias inferiores às distâncias L_0 das extensões ε_E , ε_N e

ε_I . Tal como nas análises anteriores, foram calculadas as extensões em todas as colunas entre linhas

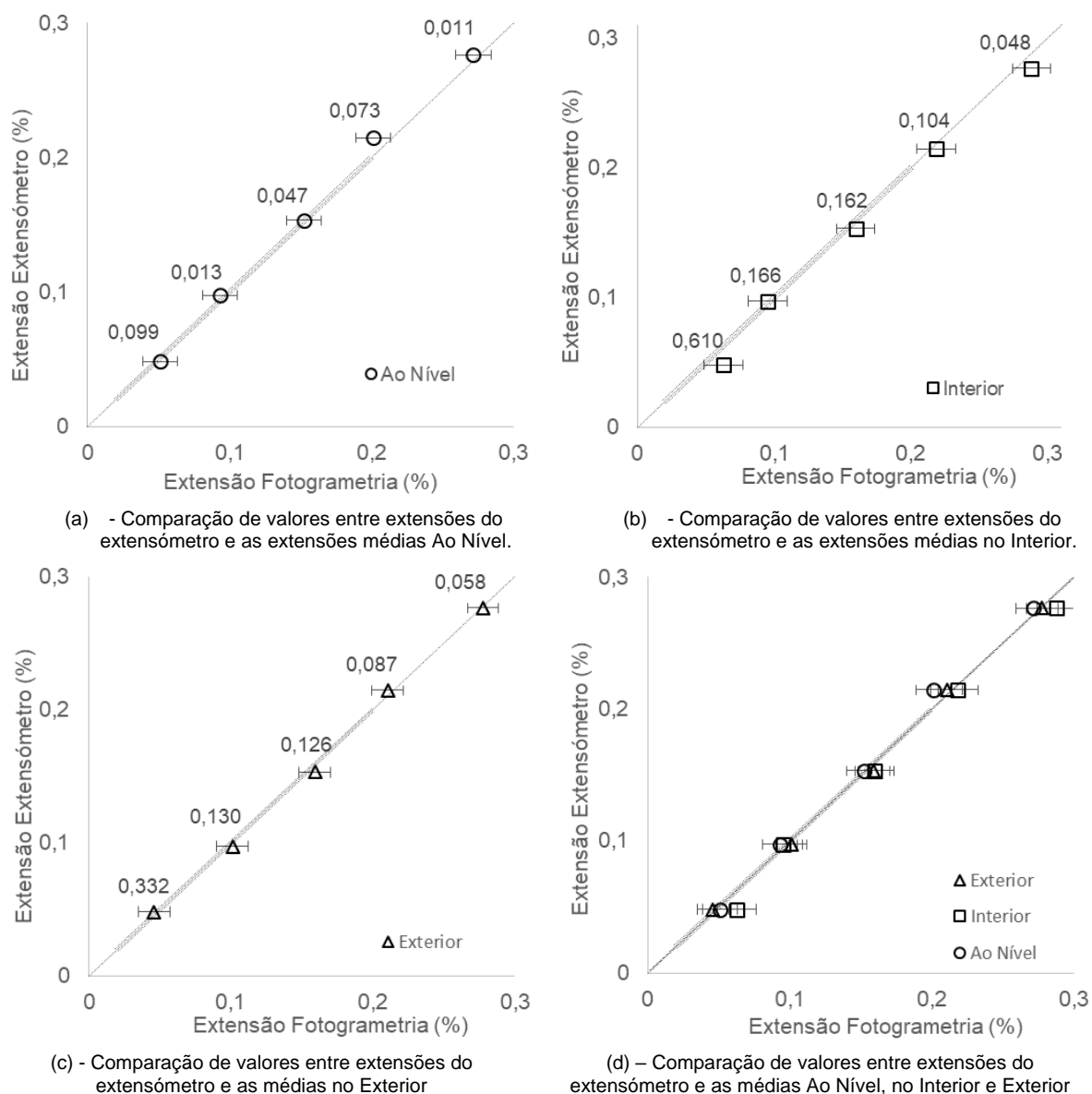


Figura 12 - Comparação de valores entre extensões do extensómetro e as médias Ao Nível, no interior e Exterior pelo método das miras.

diferentes, as extensões das miras na zona Central, ε_C , conforme apresentado na Tabela 5.

No primeiro patamar da extensão ε_6 , é possível verificar um erro relativo superior a 100%, o erro diminui para 10% no segundo patamar, mas nos seguintes volta a subir até 75%. Na extensão ε_{18} apenas o primeiro patamar apresenta um erro relativo elevado (140%) sendo que nos restantes patamares o máximo é de 9%. Nas restantes extensões medidas, o maior erro registado foi de 36%. A totalidade das medições de extensões efectuadas é apresentada no Anexo II.

Tabela 5 – Médias das extensões médias centrais ($\varepsilon_6, \varepsilon_{18}, \varepsilon_{30}, \varepsilon_{42}, \varepsilon_{54}, \varepsilon_{66}$ e ε_{78}) medidas por via das miras no ensaio P1, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

ε_C	$L_0(\text{mm})$	Média das Extensões médias (%) nos Patamares					Erro Relativo (%)					Coeficiente de Variação nos Patamares				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
ε_6	6,05	0,016	0,087	0,051	0,052	0,146	132,513	10,863	66,630	75,785	47,234	7,024	1,428	2,592	4,300	2,046
ε_{18}	18,15	0,115	0,101	0,141	0,207	0,301	139,092	3,105	8,182	3,631	8,768	0,543	0,553	0,566	0,621	0,329
ε_{30}	30,25	0,050	0,133	0,181	0,198	0,298	3,823	36,421	18,072	7,513	7,893	1,348	0,384	0,179	0,131	0,195
ε_{42}	42,35	0,046	0,118	0,158	0,245	0,288	4,374	21,490	3,044	14,135	4,109	0,826	0,364	0,226	0,168	0,107
ε_{54}	54,45	0,061	0,098	0,194	0,237	0,299	26,609	0,818	26,448	10,249	8,321	0,729	0,322	0,142	0,136	0,082
ε_{66}	66,55	0,062	0,119	0,189	0,230	0,295	27,931	21,885	23,546	7,385	6,646	0,274	0,113	0,145	0,045	0,044
ε_{78}	78,65	0,062	0,108	0,179	0,221	0,308	28,122	11,158	17,078	3,179	11,320	0,535	0,178	0,102	0,118	0,077

Para melhor compreensão dos resultados obtidos, os valores das extensões médias foram introduzidos no gráfico da Figura 14, que compara os valores de cada um dos grupos de ε_C , com ε_I e os valores do

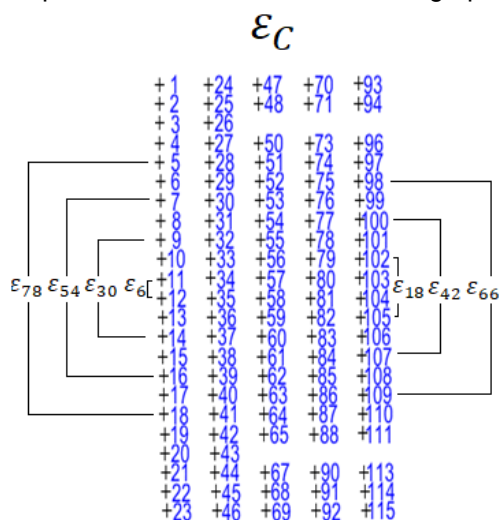


Figura 13 - Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Centrais, ε_C , ($\varepsilon_6, \varepsilon_{18}, \varepsilon_{30}, \varepsilon_{42}, \varepsilon_{54}, \varepsilon_{66}$ e ε_{78}) para as 115 miras utilizadas no provete P1.

extensómetro.

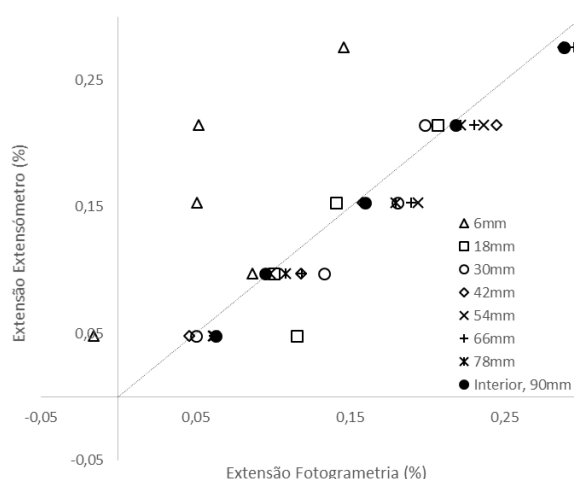


Figura 14 – Comparação entre os valores das extensões médias das miras Centrais, ε_C , com as extensões no Interior, ε_I e com as do extensómetro.

Como é possível verificar na Figura 14, este método é pouco rigoroso para miras a distâncias de 6,05mm, ε_6 , apresentando valores de erro relativos elevados entre 47% e 133%, com excepção do segundo patamar, (10%). A eficácia aumenta significativamente para ε_{18} , ainda que, neste caso, no primeiro e segundo patamares tenham um erro de 140% e 35% respectivamente. Nos seguintes patamares o erro é entre 3% e 8%.

As restantes medições, de distâncias superiores, obtiveram resultados uniformemente eficazes comparativamente com o extensómetro. Os erros das extensões ε_{30} variam entre os 36% e os 4%; nas extensões ε_{42} , entre 21% e 3%; nas extensões ε_{54} , entre 27% e 1%; nas extensões ε_{66} , entre 28% e 7%; e nas extensões ε_{78} , entre 28% e 3%. Nestes três últimos grupos de extensões referidos, os maiores erros registados verificam-se sempre no primeiro patamar.

Percebe-se então que este método tem resultados com erro inferior a 28% para medições em que miras com diâmetro de 6mm distam os seus centros mais de 30,25mm (verifica-se uma excepção com valor de 36% no segundo patamar de ε_{30}). Conclui-se assim que as distâncias correspondentes às medições das extensões ε_E , ε_N e ε_I , respectivamente 90,75mm, 102,85mm, e 114,95mm são suficientemente grandes para que os resultados obtidos sejam confiáveis, dado serem superiores a 30mm.

De seguida foi analisada a face das *features*. Para isso foram definidos cinco extensómetros virtuais no software, aproximadamente na mesma zona das cinco colunas da face das miras, e com uma distância inicial L_0 de 90mm, (que é a mesma distância que L_0 nas medições no Interior na via das miras). Uma vez que as *features* são criadas de forma aleatória, não é possível definir os polos de medição dos extensómetros virtuais na localização exacta das miras na face oposta do provete. Foi por isso feita a definição dos extensómetros virtuais da forma mais aproximada possível. Os resultados obtidos pelo *software* são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Média das extensões médias obtidas por via das *features* no ensaio P1 e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

	Média das extensões médias (%) nos Patamares					Erro Relativo (%)					Coeficiente de variação				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<i>Features</i>	0,037	0,083	0,124	0,172	0,225	23,812	15,078	18,920	20,036	18,608	0,278	0,175	0,112	0,064	0,064

O erro relativo das medições nas colunas está compreendido entre 42% e 5%, sendo que os valores mais altos são nas colunas 1 e 5, entre 42% e 13%. Nas colunas interiores, 2,3 e 4, os valores são entre 36% e 5%. O erro dos valores médios apresenta valores entre 24% e 15%. Para maior detalhe das medições efectuadas, consultar o Anexo III. Para melhor compreensão dos resultados obtidos por via das *features*, estes foram colocados nos gráficos da Figura 15.

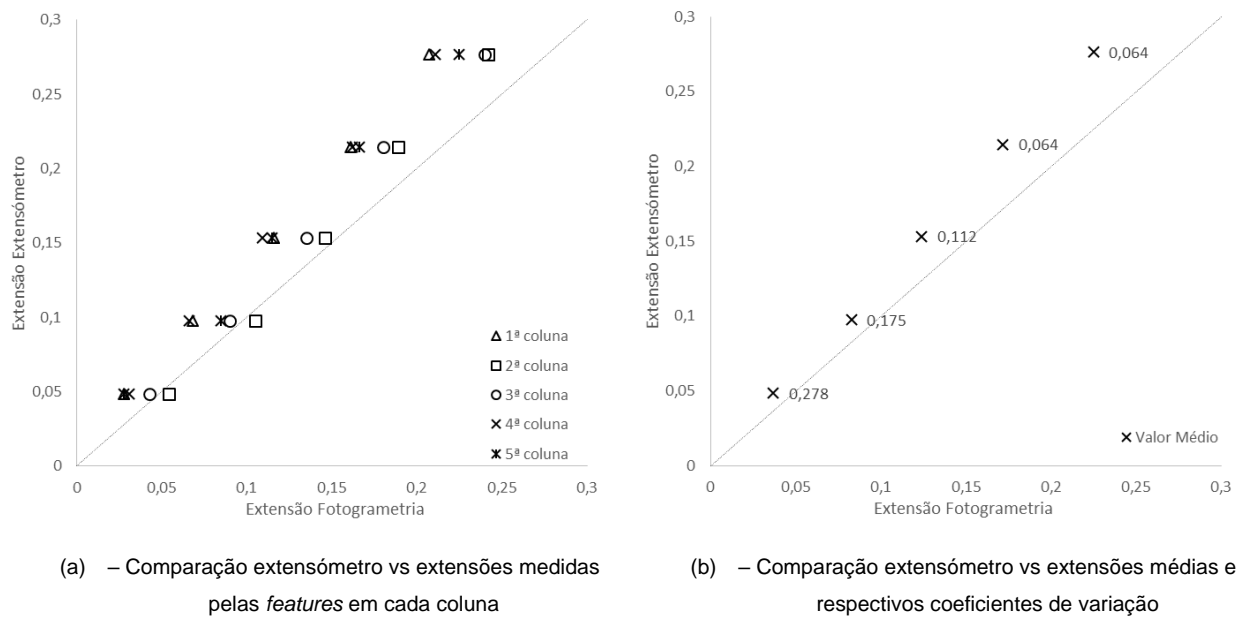


Figura 15 – Comparação dos resultados obtidos pelo extensómetro vs método das *features*.

Como se pode verificar, os valores medidos são quase na sua totalidade, menores que os medidos pelo extensómetro. Os valores dos coeficientes de variação mostram melhores resultados com o decorrer do ensaio, descendo dos 0,3% para os 0,06%.

No seguimento da análise, a fim de comparar a eficácia de cada um dos métodos, é apresentado o gráfico da Figura 16 que compara os resultados obtidos por via das miras e das *features*.

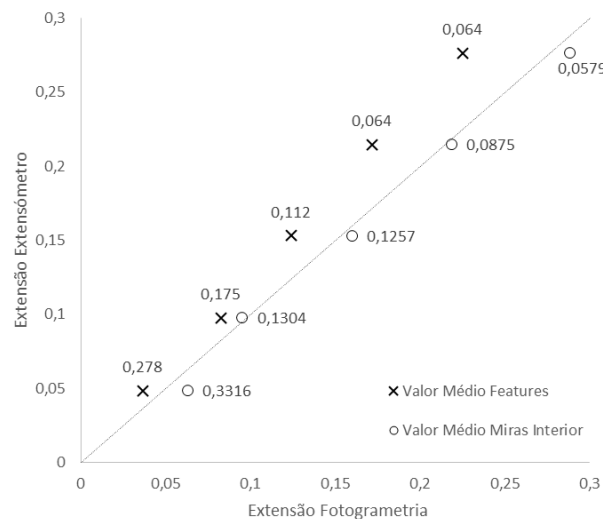


Figura 16 - Comparação dos resultados obtidos pelas miras e pelas *features* e respectivos coeficientes de variação.

No geral, a via das miras obteve resultados mais próximos dos valores registados pelo extensómetro que a via das *features*. Ainda que os coeficientes de variação sejam da mesma ordem em ambos os métodos, as medições por via das *features* via das miras estão mais próximas da bissectriz, e portanto

mais próximas das medidas consideradas padrão. Os valores do erro relativo pelas miras encontram-se entre 6% e 0,4% (excluindo um valor de 30% no primeiro patamar de ε_I), sendo que pelas *features* os valores estão compreendidos entre 24% e 15%.

Com o decorrer deste ensaio, os resultados por via das miras melhoram substancialmente a exactidão e a precisão, com o aumentar dos patamares, diminuindo o erro relativo de 30% para 2%, e o coeficiente de variação de 0,33 para 0,06. Por via das *features*, a melhoria da exactidão não é tão grande mas apresenta uma melhoria de precisão equiparável, com o erro a variar entre 24% e 15%, e o coeficiente a diminuir de 0,28 para 0,06.

4.2. Provete P2

Neste ensaio, foram medidas extensões médias no intervalo compreendido entre 0,001% e 2%. Estas medições foram feitas com recurso a 11 fotografias que foram tiradas nos 11 patamares ilustrados na Figura 17. No primeiro patamar, a fotografia respectiva serviu para definir a distância inicial, L_0 , entre miras. Assim, foi possível fazer medições apenas nos últimos 10 patamares, possibilitando então o cálculo das extensões médias comparando as 10 últimas fotografias com a primeira.

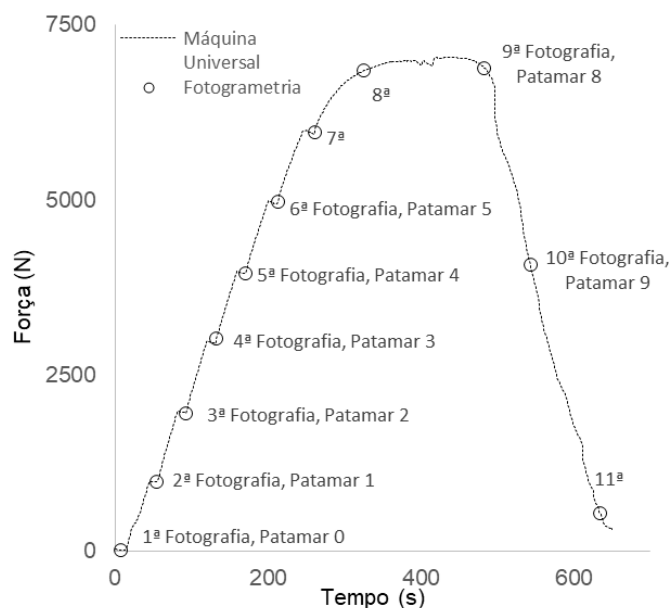


Figura 17 – Aquisição fotográfica do ensaio ao provete P2.

Para melhor compreensão, optou-se por definir o patamar da segunda fotografia como o Patamar 1, que é o primeiro patamar onde se mediram extensões médias. De forma análoga, o patamar da terceira fotografia foi definido como Patamar 2 e assim sucessivamente até ao Patamar 10 que corresponde à décima primeira fotografia. Os valores medidos pelo extensómetro, que serão usados como termo de comparação com as técnicas de processamento de imagem, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de extensão média registados pelo extensómetro no ensaio ao provete P2.

	Extensão média (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Extensómetro	0,036	0,070	0,106	0,139	0,178	0,232	0,407	0,897	1,507	1,860

O erro obtido neste ensaio tem o valor de RMS de 0,172. Neste caso, o valor de resolução espacial é de 0,074 mm/pixel. Na Tabela 8 estão mostrados os valores obtidos para estes erros.

Tabela 8 - Valores dos erros no ensaio P2.

RMS (pixel)	Erro (mm)	Erro Extensão		
		Interior L0=90,75mm	Ao Nível L0=102,85mm	Exterior L0=114,95mm
0,172	0,013	0,014	0,012	0,011

As extensões ε_N , ε_E e ε_I medidas neste ensaio estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Médias das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) medidas por via das miras no ensaio P2, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

	Média das extensões médias (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε_N	0,013	0,080	0,097	0,133	0,192	0,249	0,418	0,882	1,505	1,800
ε_E	0,001	0,078	0,084	0,115	0,139	0,214	0,368	0,777	1,294	1,579
ε_I	0,021	0,083	0,097	0,134	0,179	0,238	0,435	0,949	1,621	1,999
	Erro Relativo (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε_N	64,751	13,288	8,330	3,786	7,521	7,407	2,634	1,729	0,095	3,228
ε_E	102,140	11,306	20,962	17,140	22,096	7,897	9,647	13,459	14,143	15,104
ε_I	42,165	18,484	8,777	3,214	0,270	2,508	7,034	5,808	7,566	7,475
	Coeficiente de variação nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε_N	1,776	0,246	0,173	0,134	0,046	0,050	0,017	0,018	0,017	0,012
ε_E	37,498	0,249	0,155	0,165	0,176	0,105	0,033	0,045	0,054	0,029
ε_I	1,489	0,345	0,314	0,090	0,108	0,049	0,066	0,039	0,055	0,024

+ 1	+24	+47	+70	+93
+ 2	+25	+48	+71	+94
+ 3	+26	+49	+72	+95
+ 4	+27			
+ 5	+28	+51	+74	+97
+ 6	+29	+52	+75	+98
+ 7	+30	+53	+76	+99
+ 8	+31	+54	+77	+100
+ 9	+32	+55	+78	+101
+10			+79	+102
+11			+80	+103
+12	+35	+58	+81	+104
+13	+36	+59	+82	+105
+14	+37	+60	+83	+106
+15	+38	+61	+84	+107
+16	+39	+62	+85	+108
+17	+40	+63	+86	+109
+18	+41	+64	+87	+110
+19	+42	+65	+88	+111
+20	+43	+66	+89	+112
+21	+44			
+22	+45	+68	+91	+114
+23	+46	+69	+92	+115

ε_I ε_N ε_E

Figura 18 – Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) para as 115 miras utilizadas no provete P2.

Como se pode verificar na Tabela 9, o domínio de extensões médias estudado é inferior aos 2%. Os valores do erro relativo em relação ao extensómetro, com excepção do primeiro patamar, encontram-se no intervalo entre 22% e 0,1%. No primeiro patamar verificam-se erros bastante elevados entre 102% e 42%.

À semelhança do erro relativo, o coeficiente de variação apresenta valores elevados no primeiro patamar (1,8 a 37,5), mas a partir do segundo patamar os valores diminuem com o decorrer do ensaio num intervalo entre 0,35 e 0,01 uniformemente distribuídos pelos três grupos de medições (Ao Nível, Exterior e Interior). A totalidade das medições efectuadas são apresentadas no Anexo IV.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos, os valores das extensões foram introduzidos nos gráficos da Figura 19, que comparam os valores de cada um dos grupos com os valores do extensómetro. Neste ensaio não são visíveis as envolventes de erro tanto do extensómetro como da via das miras por serem tão pequenas.

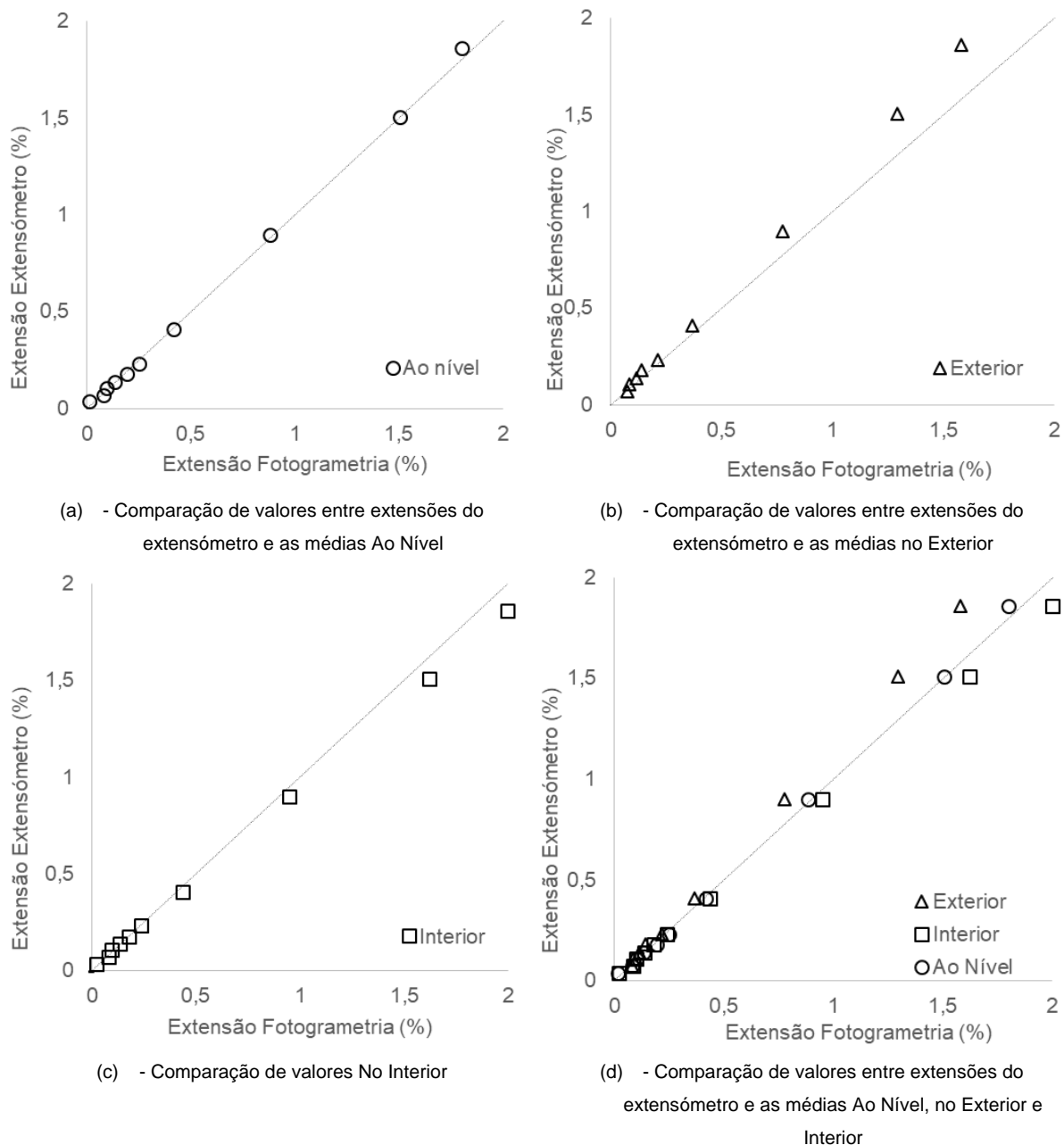


Figura 19 - Comparação de valores entre extensões do extensómetro e as médias Ao Nível, no interior e Exterior.

As medições por via das miras são bastante semelhantes às medidas pelo extensómetro. Verifica-se uma maior dispersão entre grupos de medições nos resultados médios nos três últimos patamares, Gráfico 6 - (d), em extensões na ordem de 1% a 2%. É ainda de notar que ao longo do ensaio, o grupo de medições Ao Nível é o que apresenta valores médios mais próximos dos registados pelo extensómetro. Sendo que o grupo Exterior mediu valores inferiores e o Interior mediu valores superiores ao extensómetro.

Os resultados obtidos pela via das *features* são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Média das extensões médias obtidas por via das *features* no ensaio P2 e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

	Média das Extensões Médias (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Features</i>	0,031	0,065	0,099	0,123	0,170	0,228	0,401	0,967	1,403	2,106

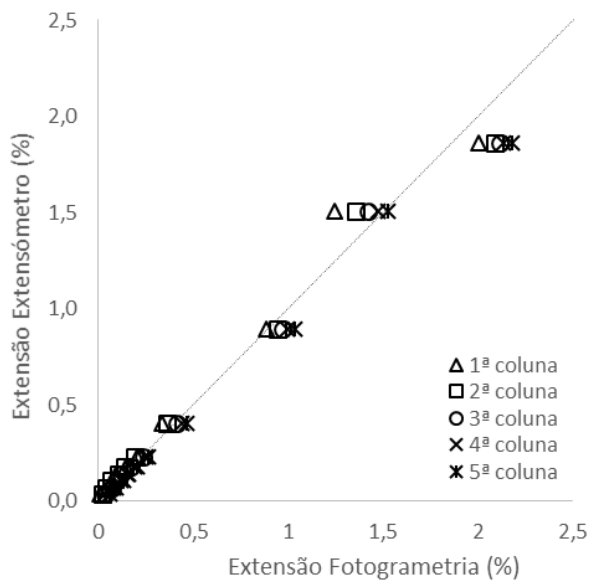
	Erro Relativo (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Features</i>	14,447	7,409	6,592	10,967	4,602	1,809	1,524	7,723	6,903	13,186

	Coeficiente de Variação nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Features</i>	0,578	0,299	0,229	0,210	0,152	0,121	0,120	0,054	0,069	0,027

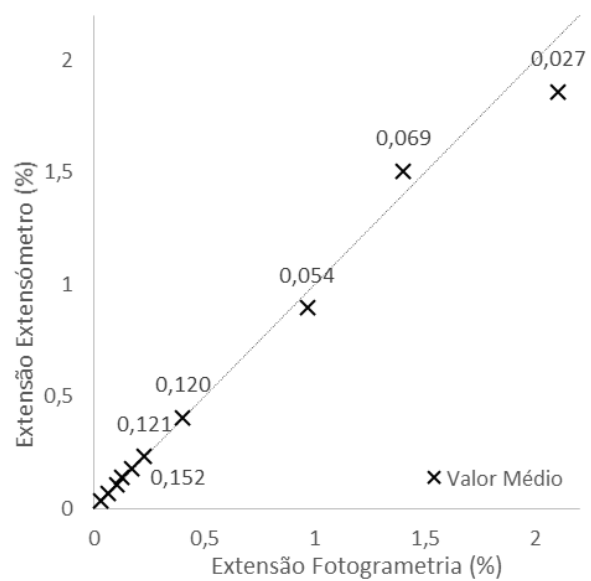
Neste ensaio, as colunas com erro relativo mais elevado são as colunas 1,2 e 5, com valores no primeiro patamar entre 83% e 47%, e nos patamares seguintes entre 42% e 1%. Nas colunas 3 e 4, os valores variam entre 16% e 0,003%, com valores excelentes no primeiro patamar (0,003% na coluna 3 e 6% na coluna 4).

O erro relativo dos valores médios é aceitável, encontrando-se no intervalo entre 14% e 2%. Sendo os dois maiores valores registados correspondentes ao primeiro e último patamar.

Os valores do coeficiente de variação diminuem a cada patamar, de 0,58 para 0,03, sendo que do primeiro patamar para o segundo, há uma diminuição para cerca de metade do valor inicial, (de 0,58 para 0,3). No Anexo V estão apresentadas a totalidade das extensões medidas. Para melhor compreender os resultados obtidos, estes foram colocados nos gráficos da Figura 20.



(a) - Comparação extensômetro vs extensões médias medidas pelas *features* em cada coluna



(b) - Comparação extensômetro vs média das extensões médias medidas nas colunas através das *features* e respectivos coeficientes de variação

Figura 20 - Comparação dos resultados obtidos pelo extensômetro vs método das *features*.

Como se pode verificar os valores medidos por via das *features* são bastante semelhantes aos medidos pelo extensômetro. De notar que os valores do penúltimo patamar são na maioria inferiores aos do extensômetro, e que no último, são todos superiores.

No seguimento da análise, a fim de comparar a eficácia de cada um dos métodos, é apresentado o gráfico da Figura 21, que compara os resultados obtidos pela via das *features* com os resultados no Interior por via das miras.

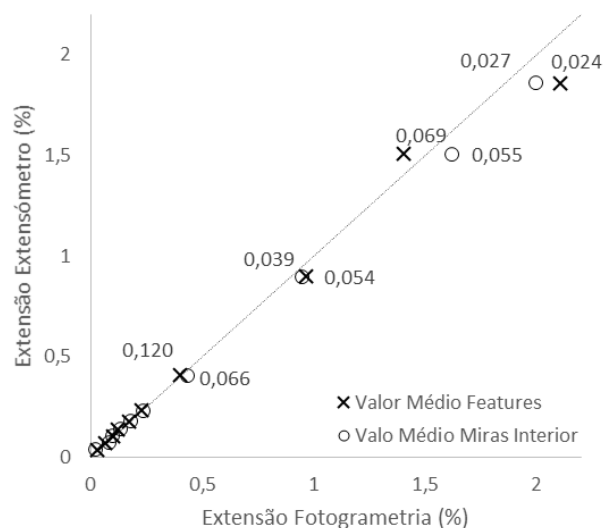


Figura 21 - Comparação dos resultados obtidos pelas miras e pelas *features* e respectivos coeficientes de variação no ensaio ao provete P2.

Verifica-se que ambas as vias tiveram resultados semelhantes bastante próximos dos medidos pelo extensómetro. O erro relativo no primeiro patamar por via das miras é de 42%, bastante superior ao registado através das *features*, de 14%. No entanto, nos patamares seguintes, pelas miras, o erro varia entre 18% e 0,3%, enquanto que pelas *features* varia entre 13% e 2%

4.3. Provete P3

Neste ensaio, foram medidas extensões médias no intervalo compreendido entre 0,051% e 1,557%. Estas medições foram feitas com recurso a 11 fotografias que foram tiradas nos 11 patamares ilustrados na Figura 22. No primeiro patamar, a fotografia respectiva serviu para definir a distância inicial, L_0 , entre miras. Assim, foi possível fazer medições apenas nos últimos 10 patamares, possibilitando então o cálculo das extensões médias comparando as 10 últimas fotografias com a primeira.

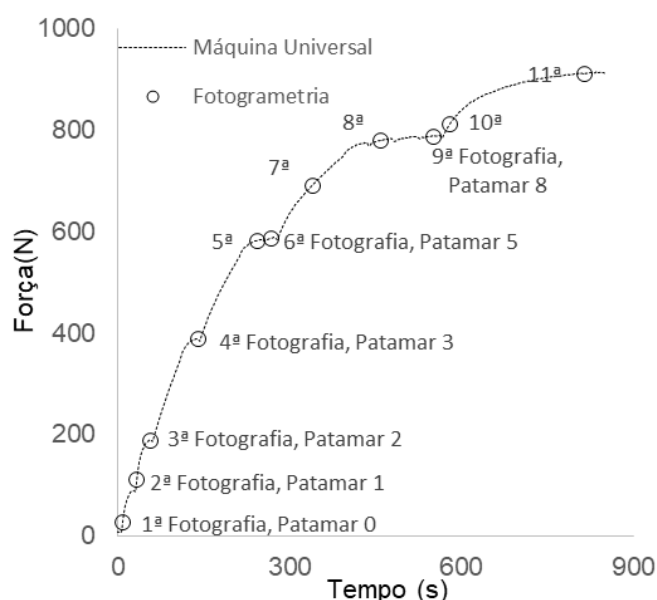


Figura 22 – Aquisição fotográfica do ensaio ao provete P3.

Para melhor compreensão, optou-se por definir o patamar da segunda fotografia como Patamar 1, que é o primeiro patamar onde se mediram extensões médias. De forma análoga, o patamar da terceira fotografia foi definido como Patamar 2 e assim sucessivamente até ao Patamar 10 que corresponde à décima primeira fotografia. Os valores medidos pelo extensómetro, que serão usados como termo de comparação com as técnicas de processamento de imagem, estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de extensão média registados pelo extensómetro no ensaio ao provete P3.

	Extensão média (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Extensómetro	0,051	0,106	0,259	0,480	0,502	0,656	0,906	0,987	1,022	1,557

O erro obtido neste ensaio tem o valor de RMS de 0,172. Neste caso, o valor de resolução espacial é de 0,074mm/pixel. Na Tabela 12 estão mostrados os valores obtidos para estes erros.

Tabela 12 – Valores dos erros no ensaio P3

RMS (pixel)	Erro (mm)	Erro Extensão		
		Interior (%) L0=90mm	Ao Nível (%) L0=102mm	Exterior (%) L0=114mm
0,172	0,013	0,014	0,013	0,011

De seguida, na Tabela 13, estão apresentadas as extensões ε_N , ε_E e ε_I medidas neste ensaio.

Tabela 13 – Médias das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) medidas por via das miras no ensaio P3, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

	Média das extensões médias (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε_N	0,037	0,101	0,259	0,441	0,468	0,620	0,693	0,911	0,942	1,437
ε_E	0,035	0,107	0,253	0,469	0,493	0,637	0,886	0,970	0,996	1,524
ε_I	0,056	0,094	0,245	0,455	0,472	0,617	0,871	0,958	0,987	1,514
	Erro Relativo (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε_N	26,956	4,514	0,048	8,076	6,721	5,462	23,527	7,761	7,841	7,713
ε_E	32,460	0,764	2,562	2,223	1,863	2,836	2,196	1,733	2,580	2,151
ε_I	9,113	11,319	5,523	5,047	6,101	6,025	3,847	2,977	3,462	2,748
	Coeficiente de variação nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε_N	0,323	0,051	0,078	0,003	0,037	0,011	0,223	0,011	0,010	0,002
ε_E	0,566	0,279	0,133	0,074	0,085	0,068	0,046	0,053	0,062	0,058
ε_I	0,674	0,199	0,091	0,054	0,052	0,043	0,044	0,059	0,061	0,048

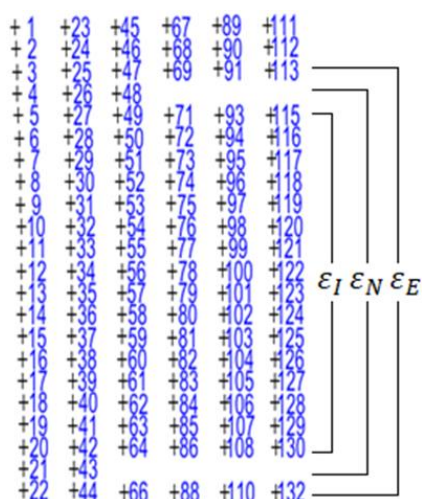


Figura 23– Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) para as 132 miras utilizadas no provete P3.

Como se pode verificar, o domínio de extensões analisado é inferior a 1,6%. Verifica-se que, mais uma vez, no primeiro patamar o erro relativo é bastante superior aos seguintes, os valores encontram-se no

intervalo entre 32% e 9%. Nos seguintes patamares o erro tem tendência a diminuir no decorrer dos patamares e varia entre 24% e 0,05%. O coeficiente de variação varia entre 0,67 e 0,002, sendo que os maiores valores registados são no primeiro patamar, com tendência a diminuir no decorrer dos patamares seguintes. No Anexo VI é apresentada a totalidade das extensões medidas.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos, os valores das extensões foram introduzidos nos gráficos da Figura 24, que comparam os valores de cada um dos grupos com os valores do extensómetro.

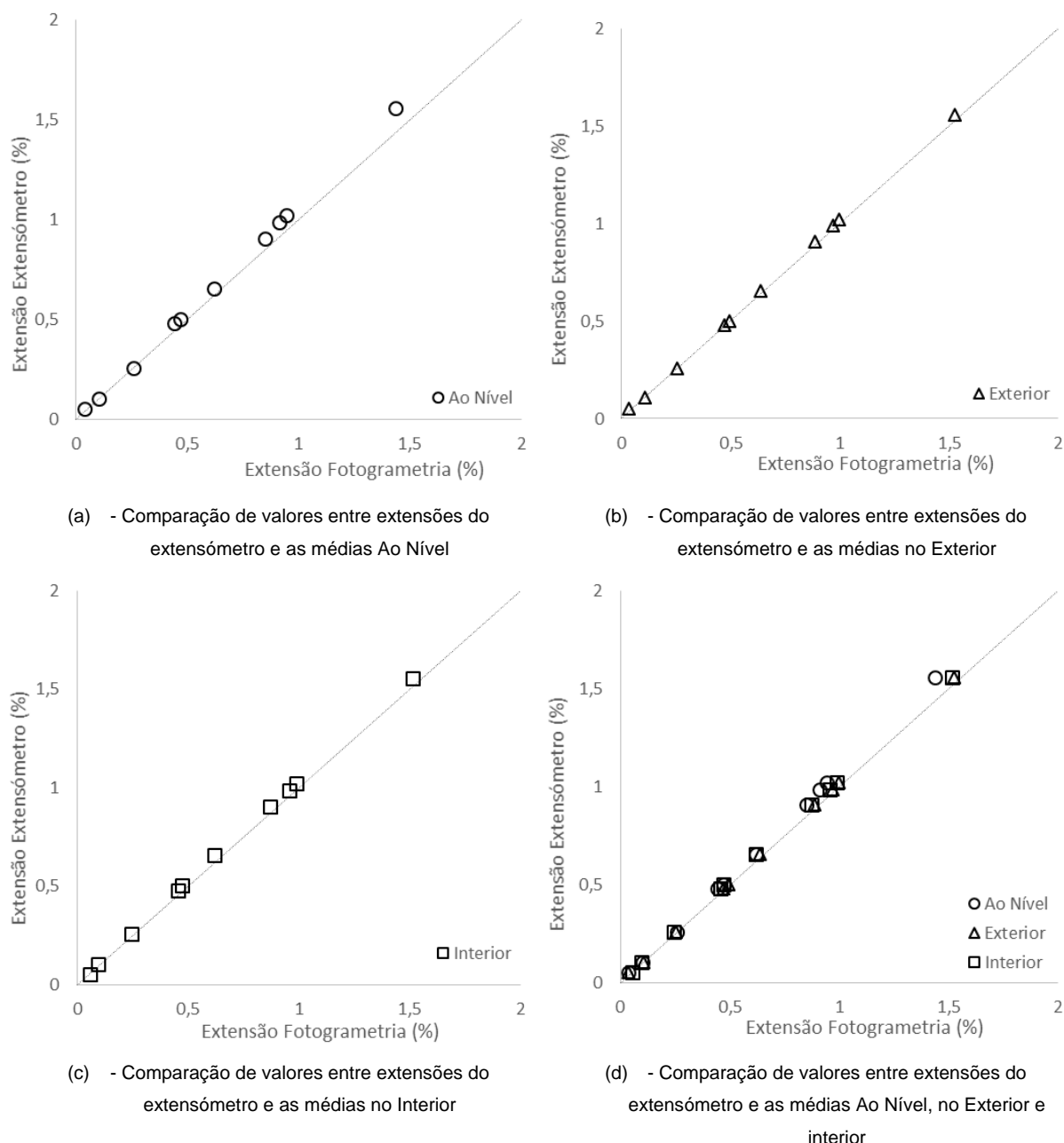


Figura 24 - Comparação de valores entre extensões do extensómetro e as médias Ao Nível, no interior e Exterior.

Neste ensaio não são visíveis as envolventes de erro tanto do extensómetro como da via das miras por serem muito reduzidas. Verifica-se que as medições foram bastante semelhantes por via das miras e através do extensómetro e ainda, que os três grupos obtiveram resultados bastante próximos entre si.

Os resultados obtidos pela via das *features* são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Média das extensões médias obtidas por via das *features* no ensaio P3 e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

	Média das extensões médias (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Features</i>	0,043	0,103	0,237	0,444	0,466	0,599	0,839	0,919	0,956	1,470
	Erro Relativo (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Features</i>	16,500	2,697	8,757	7,546	7,141	8,677	7,444	6,934	6,495	5,620
	Coeficiente de variação nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Features</i>	0,100	0,076	0,041	0,040	0,041	0,033	0,043	0,044	0,043	0,051

Neste ensaio, o erro relativo medido a nível das colunas encontra-se compreendido entre 26% e 0,2% com tendência a diminuir com o decorrer dos patamares. A nível das extensões médias, o erro encontra-se entre 17% e 3%. O coeficiente de variação apresenta valores entre 0,1 e 0,03. A totalidade das extensões medidas é apresentada no Anexo VII.

Para melhor compreender os resultados obtidos, estes foram colocados nos gráficos da Figura 25.

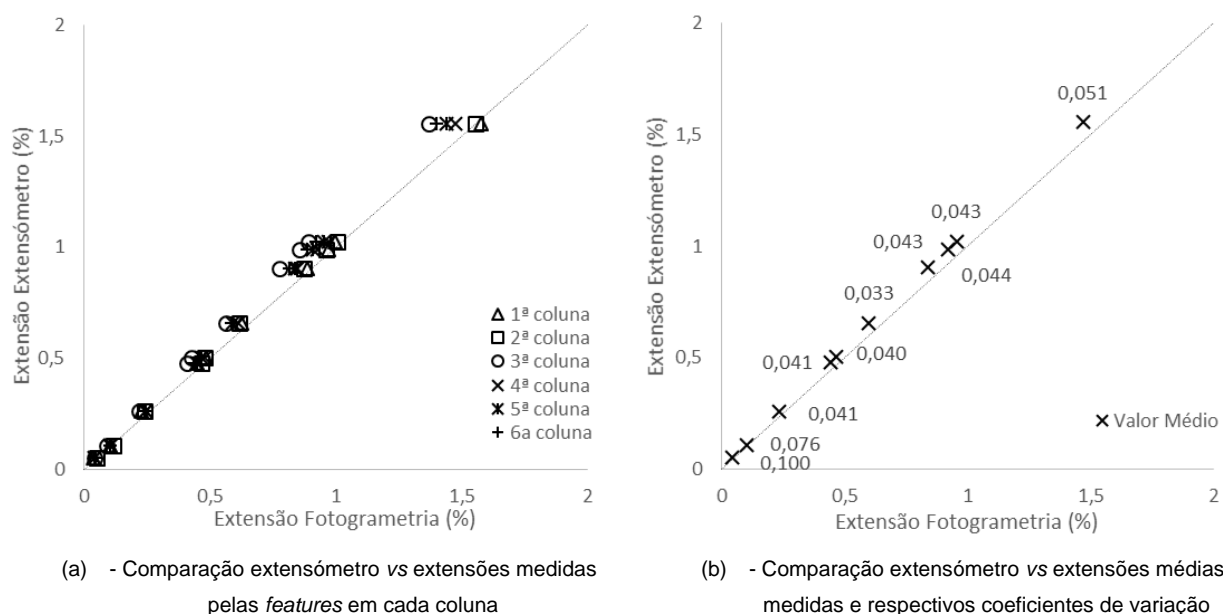


Figura 25 - Comparação dos resultados obtidos pelo extensómetro vs método das *features*.

Verifica-se que as medições foram semelhantes às registadas pelo extensómetro. Ainda assim, no geral, as medições por via das *features* tendem a ser inferiores às do extensómetro. É ainda possível

verificar que a partir do 4º patamar, a coluna 3 apresenta sempre os menores valores, e que a partir do 7º patamar as colunas 1 e 2 apresentam sempre os maiores.

No seguimento da análise, a fim de comparar a eficácia de cada um dos métodos, é apresentado o gráfico da Figura 26, que compara os resultados obtidos por cada via com os do extensômetro.

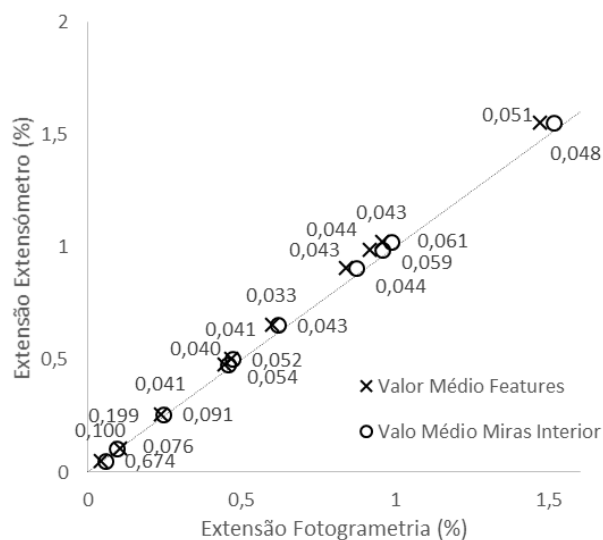


Figura 26 - Comparação dos resultados obtidos pelas miras e pelas *features* e respectivos coeficientes de variação.

É possível verificar que as duas vias obtiveram resultados semelhantes. Ambas as vias mediram valores inferiores aos registados pelo extensômetro. Ainda assim, a via das miras foi a que obteve medições mais próximas do extensômetro. Verifica-se ainda que, relativamente ao coeficiente de variação, com excepção do primeiro e segundo patamar das miras (0,674 e 0,199 respectivamente), os valores de ambas as vias foram semelhantes, na mesma ordem de grandeza.

4.4. Provete P4

Neste ensaio, foram medidas extensões médias no intervalo compreendido entre 0,051% e 1,557%. Estas medições foram feitas com recurso a 10 fotografias que foram tiradas nos 10 patamares ilustrados na Figura 27. No primeiro patamar, a fotografia respectiva serviu para definir a distância inicial, L_0 , entre miras. Assim, foi possível fazer medições apenas nos últimos 9 patamares, possibilitando então o cálculo das extensões médias comparando as 9 últimas fotografias com a primeira.

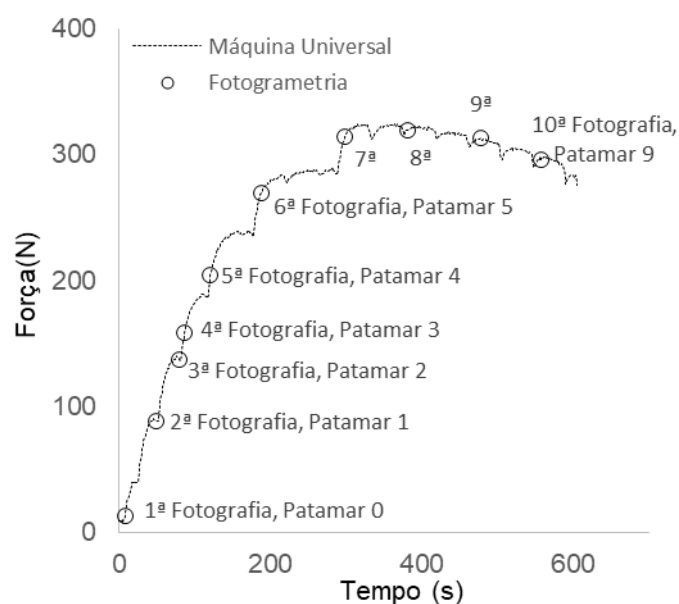


Figura 27 – Aquisição fotográfica do ensaio ao provete P4.

Para melhor compreensão, optou-se por definir o patamar da segunda fotografia como Patamar 1, que é o primeiro patamar onde se mediram extensões médias. De forma análoga, o patamar da terceira fotografia foi definido como Patamar 2 e assim sucessivamente até ao Patamar 10 que corresponde à décima fotografia. Os valores medidos pelo extensómetro, que serão usados como termo de comparação com as técnicas de processamento de imagem, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores de extensão média registados pelo extensómetro no ensaio ao provete P3.

	Extensão média (%) nos Patamares								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Extensómetro	0,061	0,112	0,130	0,187	0,303	0,488	0,718	1,047	1,418

O erro obtido neste ensaio tem o valor de RMS de 0,175. Neste caso, o valor de resolução espacial é de 0,074mm/pixel. Na Tabela 16 estão mostrados os valores obtidos para estes erros.

Tabela 16 – Valores dos erros no ensaio PVC furado.

RMS (pixel)	Erro (mm)	Erro Extensão (%)		
		Interior L0=90,78mm	Ao Nível L0=102,85mm	Exterior L0=114,95mm
0,175	0,013	0,014	0,013	0,011

De seguida, na Tabela 17, estão apresentadas as extensões ε_N , ε_E e ε_I medidas neste ensaio.

Tabela 17 – Médias das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) medidas por via das miras no ensaio P4, e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

Média das extensões médias (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε_N	0,033	0,077	0,072	0,135	0,256	0,410	0,633	0,930	1,284
ε_E	0,057	0,087	0,084	0,137	0,239	0,416	0,587	0,886	1,190
ε_I	-0,082	0,093	0,093	0,151	0,244	0,479	0,714	1,053	1,475
Erro Relativo (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε_N	46,054	30,732	44,216	28,135	15,706	16,040	11,926	11,173	9,467
ε_E	7,430	22,490	35,529	26,729	21,338	14,640	18,259	15,359	16,072
ε_I	234,743	17,016	28,089	19,569	19,547	1,750	0,515	0,571	3,987
Coeficiente de variação nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε_N	12,571	5,377	5,776	3,106	1,645	1,049	0,704	0,500	0,366
ε_E	0,156	0,348	0,277	0,157	0,080	0,083	0,040	0,033	0,006
ε_I	3,529	0,319	0,487	0,211	0,314	0,064	0,052	0,030	0,024

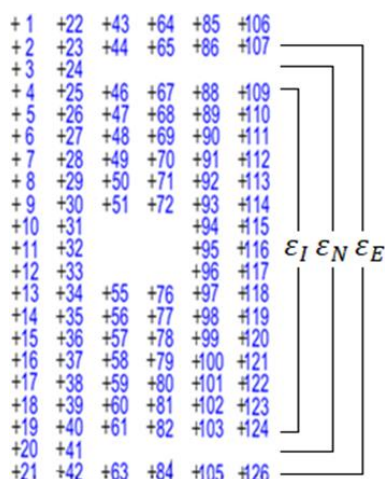


Figura 28 – Ilustração da nomenclatura adoptada das extensões médias Ao Nível (ε_N), Exteriores (ε_E) e Interiores (ε_I) para as 126 miras utilizadas no provete P4.

Neste ensaio, o domínio das extensões estudadas é inferior a 1,5%. Verifica-se novamente que o primeiro patamar apresenta os maiores erros relativos, entre 235% e 7%. Este valor, 234%, corresponde ao grupo Interior e é devido à medição de extensão no primeiro patamar na coluna 5, com o valor de -0,731, que torna a extensão média negativa com valor de -0,082. O valor registado pelo extensómetro neste patamar é de 0,061, originando assim este erro relativo enorme. No entanto, excluindo o valor da coluna 5, como erro de cálculo, obtém-se uma extensão média de 0,047, que tem um erro relativo aos 0,061 do extensómetro, de 22,820. Diminui assim o intervalo de erro do primeiro patamar para 46% a 7%. Nos restantes patamares, o erro está entre 44% e 0,5% sendo que o grupo Interior apresenta os menores valores de erro.

Relativamente ao coeficiente de variação, nas medições Ao Nível, verificam-se os piores resultados, sendo que apenas a partir do 7º patamar se apresentam valores inferiores a 1, entre 0,704 e 0,366. Nas restantes medições verificam-se valores entre 0,487 e 0,006, com excepção do primeiro patamar

no Interior também superior a 1. Este valor, como referido anteriormente, é devido a um provável erro de medição na coluna 5. Sem contabilizar essa medição, o valor do coeficiente de variação seria de 0,547. A totalidade das extensões medidas é apresentada no Anexo VIII.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos, os valores das extensões foram introduzidos nos gráficos da Figura 29, que comparam os valores de cada um dos grupos com os valores do extensómetro.

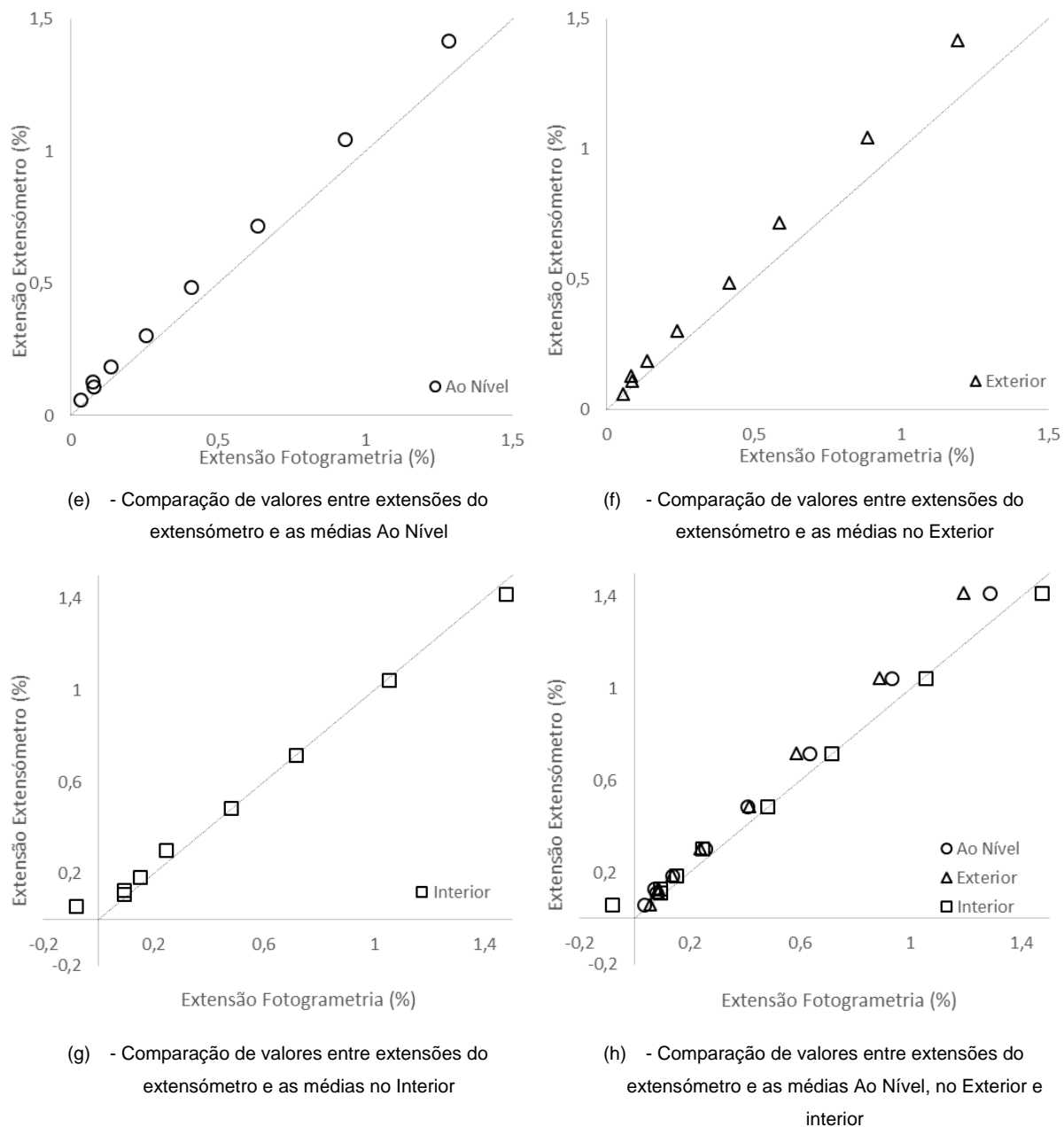


Figura 29 - Comparação de valores entre extensões do extensómetro e as médias Ao Nível, no interior e Exterior.

Neste ensaio não são visíveis as envolventes de erro tanto do extensómetro como da via das miras por serem tão pequenas. Verifica-se o que foi já concluído pela tabela: o grupo Interior obteve os valores

mais exactos (ainda que tenha uma medição no primeiro patamar completamente fora dos valores expectados). É de notar ainda que os grupos Exterior e Ao Nível mediram valores inferiores aos do extensómetro, sendo os menores os do Exterior.

Os resultados obtidos pela via das *features* são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Média das extensões médias obtidas por via das *features* no ensaio P4 e respectivos erros relativos e coeficientes de variação.

	Média das extensões médias (%) nos Patamares								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Features</i>	0,053	0,104	0,105	0,174	0,290	0,476	0,753	1,110	1,510
	Erro relativo (%) nos Patamares								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Features</i>	13,941	6,959	19,238	6,873	4,385	2,385	4,869	6,079	6,458
	Coeficiente de variação nos Patamares								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Features</i>	0,077	0,045	0,060	0,042	0,038	0,044	0,050	0,044	0,035

Novamente, os maiores valores do erro relativo das colunas são do primeiro patamar, entre 25% e 4%. Nos seguintes patamares o erro está entre 27% e 0,2%. Relativamente ao erro da médias das extensões médias, este encontra-se entre 19% e 2%. O coeficiente de variação apresenta valores bastante bons, entre 0,08 e 0,04, com tendência para diminuir ao longo do ensaio apresentando por isso elevada precisão. A totalidade das extensões medidas é apresentada no Anexo IX.

Para melhor compreender os resultados obtidos, estes foram colocados nos gráficos da Figura 30.

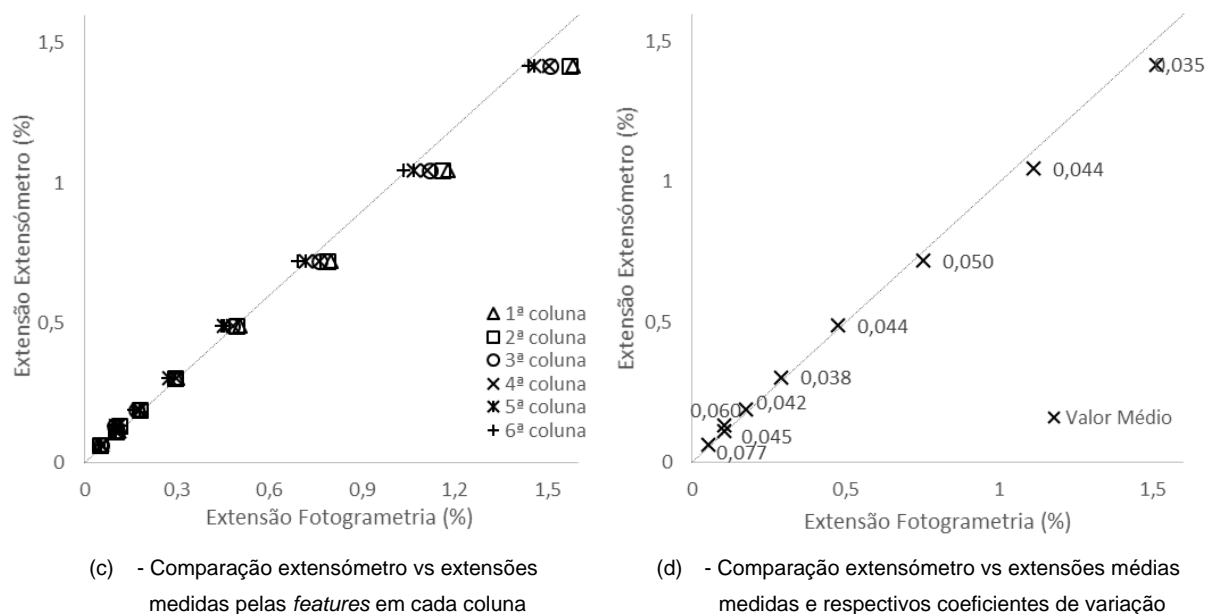


Figura 30 - Comparação dos resultados obtidos pelo extensómetro vs método das *features*.

Como referido na Tabela 14, os valores por via das *features* são bastante semelhantes aos medidos pelo extensómetro, mostrando boa exactidão do método. Verifica-se que a partir do 7º patamar as medições por via das *features* foram superiores às registadas pelo extensómetro.

No seguimento da análise, a fim de comparar a eficácia de cada um dos métodos, é apresentado o gráfico da Figura 31, que compara os resultados obtidos por cada via.

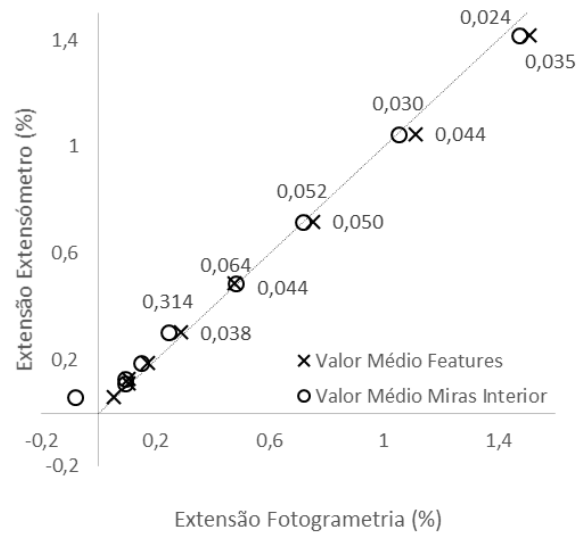


Figura 31 - Comparação dos resultados obtidos pelas miras e pelas *features* e respectivos coeficientes de variação.

Verifica-se que as duas vias obtiveram resultados semelhantes. Ainda assim, a via das miras obteve medições mais aproximadas das registadas pelo extensómetro nos últimos patamares (no primeiro patamar, como referido anteriormente, existe um erro enorme neste grupo). É também possível verificar que a via das *features* teve tendência a fazer medições superiores às efectuadas por via das miras.

5 Conclusão e Desenvolvimentos Futuros

5.1. Conclusão

Os métodos de processamento de imagem utilizados permitem uma análise mais detalhada do que os extensómetros tradicionais que apenas medem extensões médias. É possível medir extensões em qualquer direcção e fazer um número de medições superior. O número de medições depende do número e orientação das miras. Por via das *features*, podem ser feitas medições em qualquer direcção, inclusive com distâncias iniciais praticamente nulas e com um número de medições normalmente superior ao das miras.

Para que os resultados sejam exactos e precisos, há que ter em atenção diversos factores. A aquisição de imagem é de extrema importância, sendo indispensável garantir que as condições de iluminação são adequadas, evitando sombras ou reflexos nos provetes a analisar. É também necessário utilizar um factor de escala adequado, ou seja, uma medida conhecida nas imagens. É ainda preciso fazer a calibração correta das máquinas fotográficas e alinhar corretamente as mesmas com os provetes por forma a melhorar a qualidade das fotografias. A pintura dos provetes deve também ser cuidada (GOM, 2019; Valença et al., 2012).

Relativamente à exactidão das medições com recurso à fotogrametria e utilização de miras, obtiveram-se os seguintes resultados:

- No ensaio do provete P1 em alumínio, obteve-se um erro relativo entre 0.4% e 6% na medição de extensões médias entre 0.1% e 0.3%; no ensaio do provete P2, também em alumínio com furação, obteve-se um erro relativo entre 0.1% e 22.0% na medição de extensões médias entre 0.07% e 1.9%.
- No ensaio do provete P3 em PVC, obteve-se um erro relativo entre 0.05% e 24% na medição de extensões médias entre 0.1% e 1.6%; no ensaio do provete P4, em PVC e com furação, obteve-se um erro relativo entre 0.5% e 44% na medição de extensões médias entre 0.1% e 1.4%.

Conclui-se que a medição de extensões com recurso à fotogrametria permite obter melhores resultados em provetes não furados provavelmente devido à maior uniformidade das extensões. Por outro lado, verificou-se que o erro relativo máximo foi observado nos ensaios dos provetes em PVC, situação que pode ser explicada pela maior dificuldade encontrada em estabilizar o controlo da máquina de tracção universal aquando do momento de captura das imagens nos vários patamares. Esta situação pode provocar um desfasamento mais significativo nas leituras efectuadas pela máquina de tracção universal e o instante de captura da fotografia correspondente.

Relativamente à exactidão das medições com recurso ao processamento digital de imagem e às *features*, obtiveram-se os seguintes resultados:

- No ensaio do provete P1 em alumínio obteve-se um erro relativo entre 15.0% e 20.0% na medição de extensões médias entre 0.1% e 0.3%; no ensaio do provete P2, com furação, obteve-se um erro relativo entre 1.5% e 13.2% na medição de extensões médias entre 0.07% e 1.9%.
- No ensaio do provete P3 em PVC obteve-se um erro relativo entre 2.7% e 8.8% na medição de extensões médias entre 0.1% e 1.6%; no ensaio do provete P4, com furação, obteve-se um erro relativo entre 2.4% e 19.2% na medição de extensões médias entre 0.1% e 1.4%.

Comparando os resultados da fotogrametria com os do processamento digital de imagem, os mesmos apresentam-se algo dispersos podendo apenas concluir-se que no caso do ensaio do provete P1, na medição de extensões relativamente baixas, entre 0.1% e 0.3%, os resultados obtidos através da fotogrametria são mais exactos.

Relativamente à precisão das medições com recurso à fotogrametria e utilização de miras, obtiveram-se os seguintes resultados:

- No ensaio do provete P1 em alumínio obtiveram-se coeficientes de variação entre 0,011 e 0,166 na medição de extensões médias entre 0.1% e 0.3%; no ensaio do provete P2, com furação, obtiveram-se coeficientes de variação entre 0,012 e 0,345 na medição de extensões médias entre 0.07% e 1.9%.
- No ensaio do provete P3 em PVC obtiveram-se coeficientes de variação entre 0,002 e 0,279 na medição de extensões médias entre 0.1% e 1.6%; no ensaio do provete P4, com furação, obtiveram-se coeficientes de variação entre 0,006 e 0,487, na medição de extensões médias entre 0.1% e 1.4% (excluindo os valores do grupo Ao Nível, cujas medições de extensões são muito diferentes originando valores de coeficientes de variação muito elevados, entre 0,366 e 5,776).

Relativamente à precisão das medições com recurso ao processamento digital de imagem e às *features*, obtiveram-se os seguintes resultados:

- No ensaio do provete P1 em alumínio obtiveram-se coeficientes de variação entre 0,175 e 0,064 na medição de extensões médias entre 0.1% e 0.3%; no ensaio do provete P2, com furação, obtiveram-se coeficientes de variação entre 0,027 e 0,299 na medição de extensões médias entre 0.07% e 1.9%.
- No ensaio do provete P3 em PVC obtiveram-se coeficientes de variação entre 0,033 e 0,076 na medição de extensões médias entre 0.1% e 1.6%; no ensaio do provete P4, com furação, obtiveram-se coeficientes de variação entre 0,035 e 0,060, na medição de extensões médias entre 0.1% e 1.4%.

Os valores de coeficiente de variação registados tendem a diminuir com o decorrer dos ensaios. É assim possível concluir que a via das miras obtém resultados de precisão melhores que a via das *features* com o aumento dos patamares. No entanto, os valores da precisão nos primeiros patamares tendem a ser piores por via das miras.

Os valores de exactidão e precisão referidos são apresentados na Tabela para melhor compreensão.

Tabela 19 - Valores de exactidão e precisão medidos por via das miras e das *features*.

	Extensão média (%)	Fotogrametria (Miras)		Correlação Digital de Imagem (<i>Features</i>)	
		Erro relativo (%)	Coefficiente de variação	Erro relativo (%)	Coefficiente de variação
P1	0,1 a 0,3	0,4 a 6	0,011 a 0,166	15 a 20	0,064 a 0,175
P2	0,07 a 1,9	0,1 a 22	0,012 a 0,345	1,5 a 13,2	0,027 a 0,299
P3	0,1 a 1,6	0,05 a 24	0,002 a 0,279	2,7 a 8,8	0,033 a 0,076
P4	0,1 a 1,4	0,5 a 44	0,006 a 0,487	2,4 a 19,2	0,035 a 0,060

O uso de técnicas de processamento de imagem mostrou ser eficaz na medição de extensões em objetos de pequena dimensão. Esta é uma forma de análise de extensões bastante eficaz e substancialmente mais económica que o uso de extensómetros tradicionais (Pimenta, 2017; Valença, 2006).

Os resultados obtidos foram de uma forma geral positivos uma vez que se aproximaram bastante das medições efectuadas pelo extensómetro apresentando baixos valores de erro relativo. A excepção verificou-se apenas no primeiro patamar de cada ensaio por via das miras, em que as extensões em questão são extremamente pequenas, onde se verificaram por vezes enormes diferenças em relação ao extensómetro. No entanto, no patamar seguinte essas diferenças reduziram drasticamente, tendo sido a maior registada de 30%.

Comparando ambas as vias utilizadas, a que mostrou obter melhores resultados foi a via das miras. Em contrapartida, esta é bastante mais trabalhosa e demorada, exigindo um pós-processamento de duração muitíssimo superior. Em suma, é aconselhável o uso da via das miras para estudo pormenorizado de extensões, em detrimento da via das *features*.

5.2. Desenvolvimentos Futuros

Como complemento deste trabalho realizado, propõe-se o estudo de alguns trabalhos a fim de responder a questões que se foram levantando ao longo desta dissertação:

- Estudo pormenorizado de extensões transversais.
- Estudo de extensões em objetos de dimensão inferiores aos analisados.
- Estudo em 3D de extensões em objetos da mesma dimensão dos analisados.

Referências Bibliográficas

- Albuquerque, Márcio P., Albuquerque, Marcelo P., 2000. Processamento de imagens: métodos e aplicações. Cent. Bras. Pesqui. Físicas – CBPF/MCT 1–12.
- Almeida, G., Melício, F., Biscaia, H., Chastre, C., Fonseca, J.M., 2015. In-Plane Displacement and Strain Image Analysis. Comput. Civ. Infrastruct. Eng. 00, 1–13. <https://doi.org/10.1111/mice.12127>
- ASP (American Society of Photogrammetry), 1980. Manual of Photogrammetry, 4 ed. ed. Falls Church, VA. Chester C.
- Berberan, A., 2002. Apontamentos de apoio às aulas de Fotogrametria I e II [WWW Document]. Dep. Matemática da Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Coimbra. URL <http://www.mat.uc.pt/~engeo/cadeiras/ano4/Fotogrametria/>
- Berberan, A., 1985. Observação de estruturas por fotogrametria: um método. LNEC (ICT Informação Técnica; Barragens, ITB 3), Lisboa.
- Burtch, R., n.d. History of Photogrammetry [WWW Document]. Cent. Photogramm. Training; Ferris State Univ. URL <https://www.koofers.com/files/notes-pxjjvytswk/>
- Chousal, J.A.G., de Moura, M.F.S., 2007. Validação da medição de deformações por correlação digital de imagem em compósitos laminados de matriz polimérica. Rev. Iberoam. 11, 23–34.
- Criminisi, A., 2001. Accurate Visual Metrology from Single and Multiple Uncalibrated Images, Distinguished Dissertation Series. ISBN: 185233468. Springer-Verlag.
- Fu, K., Gonzales, R., Lee, C., 1987. Robotics – Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hil. ed. New York.
- GOM, 2019. Gom Correlate Software [WWW Document]. URL <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html>
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., 2002. Digital image processing. Pearson.
- Lúcio, V., 2006. Estruturas de betão armado I, capítulo 3 - Materiais [WWW Document]. FCT/UNL. URL http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Betao_armado_I/downloads/11Flexacompostaedesviadacor.pdf
- Marques, F.B., 2016. Monitorização de Pórticos de Betão Armado com Alvenaria de Tijolo através de Fotogrametria.
- Marques Filho, O., Vieira Neto, H., 1999. Processamento Digital de Imagens. Rio de Janeiro.
- Pimenta, R., 2017. Avaliação da corrosão em estruturas de betão armado com recurso à Fotogrametria.
- Portela, A., Silva, A., 1996. Apontamentos de apoio às aulas de Mecânica dos meios Contínuos [WWW Document]. Departamento de Engenharia Civil. URL http://www2.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Estruturas/Mecanica_Meios_Continuos/upgrade/I_extensometri

a.pdf

Valença, J., Júlio, E.N.B.S., Araújo, H.J., 2012. Applications of photogrammetry to structural assessment. *Exp. Tech.* 36, 71–81. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00731.x>

Valença, J.M. de A., 2006. Aplicações de Fotogrametria à Engenharia de Estruturas.

Zwick/Roell, 2019. makroXtens Extensometer [WWW Document]. URL <https://www.zwick.com/extensometers/makroxtens>

Anexos

Anexo I – Extensões por via das miras, ao nível, exterior e interior, ensaio P1

					Extensão (%) nos Patamares				
		Linhas	Coluna	Miras	1	2	3	4	5
ε_N	Ao Nível	3--20	1	3--20	0,046	0,092	0,145	0,187	0,269
			2	26--43	0,056	0,094	0,160	0,216	0,275
ε_E	Exterior	2--21	1	2--21	0,030	0,105	0,133	0,182	0,250
			2	25--44	0,054	0,091	0,172	0,235	0,279
			3	48--67	0,030	0,102	0,146	0,226	0,301
			4	71--90	0,070	0,124	0,155	0,204	0,279
			5	94--113	0,046	0,085	0,190	0,206	0,279
ε_I	Interior	4--19	1	4--19	-0,004	0,083	0,137	0,185	0,266
			2	27--42	0,073	0,094	0,141	0,211	0,280
			3	50--65	0,095	0,085	0,168	0,222	0,291
			4	73--88	0,103	0,126	0,207	0,255	0,298
			5	96--111	0,048	0,088	0,146	0,219	0,305
Extensómetro					0,048	0,098	0,153	0,215	0,276

Desvio Padrão nos Patamares					
	1	2	3	4	5
Ao Nível	0,00005	0,00001	0,00007	0,00015	0,00003
Exterior	0,00015	0,00013	0,00020	0,00018	0,00016
Interior	0,00038	0,00016	0,00026	0,00023	0,00014

Anexo II – Extensões centrais por via das miras, ensaio P1

			Extensão (%) nos Patamares					Desvio Padrão nos Patamares				
L_0 (mm)	Coluna	Miras	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
6,05	1	11--12	0,049	-0,045	-0,087	0,158	0,393	0,00110	0,00124	0,00133	0,00223	0,00298
	2	34--35	0,017	0,016	-0,019	0,192	0,123					
	3	57--58	-0,123	0,101	0,108	0,270	-0,280					
	4	80--81	-0,159	0,316	0,283	-0,002	0,549					
	5	103--104	0,137	0,046	-0,030	-0,358	-0,056					
18,15	1	10--13	0,046	0,083	0,009	0,030	0,126	0,00063	0,00056	0,00080	0,00128	0,00099
	2	33--36	0,096	0,039	0,134	0,148	0,279					
	3	56--59	0,223	0,136	0,188	0,330	0,422					
	4	79--82	0,143	0,190	0,249	0,378	0,353					
	5	102--105	0,069	0,055	0,123	0,149	0,324					
30,25	1	9--14	-0,078	0,040	0,138	0,191	0,268	0,00068	0,00051	0,00032	0,00026	0,00058
	2	32--37	0,084	0,179	0,232	0,203	0,412					
	3	55-60	0,047	0,178	0,156	0,217	0,271					
	4	78--83	0,087	0,146	0,187	0,228	0,291					
	5	101--106	0,112	0,123	0,191	0,153	0,250					
42,35	1	8--15	-0,009	0,075	0,124	0,201	0,253	0,00038	0,00043	0,00036	0,00041	0,00031
	2	31--38	0,030	0,064	0,130	0,205	0,279					
	3	54--61	0,101	0,152	0,198	0,285	0,285					
	4	77-84	0,034	0,127	0,133	0,232	0,276					
	5	100--107	0,075	0,175	0,204	0,302	0,345					
54,45	1	7--16	0,020	0,058	0,163	0,239	0,263	0,00045	0,00032	0,00028	0,00032	0,00025
	2	30--39	0,079	0,095	0,184	0,262	0,336					
	3	53--62	0,039	0,081	0,202	0,249	0,298					
	4	76--85	0,028	0,105	0,176	0,174	0,286					
	5	99--108	0,140	0,153	0,243	0,259	0,314					
66,55	1	6--17	0,084	0,130	0,208	0,247	0,302	0,00017	0,00013	0,00027	0,00010	0,00013
	2	29--40	0,064	0,099	0,190	0,234	0,286					
	3	52--63	0,073	0,121	0,199	0,230	0,317					
	4	75--86	0,035	0,108	0,137	0,216	0,285					
	5	98--109	0,053	0,135	0,213	0,224	0,284					
78,65	1	5--18	0,015	0,100	0,166	0,223	0,274	0,00033	0,00019	0,00018	0,00026	0,00024
	2	28--41	0,033	0,102	0,163	0,200	0,289					
	3	51--64	0,092	0,142	0,210	0,255	0,332					
	4	74--87	0,070	0,084	0,167	0,185	0,309					
	5	97--110	0,100	0,114	0,191	0,244	0,334					
Extensómetro			0,048	0,098	0,153	0,215	0,276					

Anexo III – Extensões por via das *features*, ensaio P1

Coluna	Extensão (%) nos Patamares				
	1	2	3	4	5
1	0,028	0,068	0,116	0,161	0,207
2	0,054	0,105	0,146	0,189	0,242
3	0,043	0,090	0,135	0,180	0,240
4	0,031	0,066	0,109	0,162	0,211
5	0,028	0,085	0,115	0,166	0,225
Extensómetro	0,048	0,098	0,153	0,215	0,276
Coluna	Erro Relativo (%) nos Patamares				
	1	2	3	4	5
1	42,031	30,258	24,273	24,975	25,119
2	11,797	7,690	4,689	11,927	12,459
3	10,976	7,694	11,870	16,121	13,182
4	35,820	32,309	28,843	24,509	23,673
5	42,031	12,822	24,926	22,645	18,608
Desvio padrão nos Patamares					
1	2	3	4	5	
0,01023	0,01450	0,01396	0,01104	0,01438	

Anexo IV – Extensões por via das miras, ao nível, exterior e interior, ensaio P2

				Extensão (%) nos Patamares									
	Linhas	Coluna	Miras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ao Nível	4--21	1	4--21	0,035	0,099	0,114	0,151	0,200	0,262	0,424	0,897	1,530	1,822
		2	27--44	-0,010	0,060	0,081	0,115	0,183	0,237	0,411	0,866	1,480	1,778
Exterior	3--22	1	3--22	0,016	0,078	0,087	0,111	0,139	0,231	0,375	0,814	1,370	1,636
		2	26--45	0,043	0,099	0,106	0,133	0,167	0,249	0,384	0,806	1,326	1,627
		3	49--68	-0,014	0,080	0,065	0,127	0,152	0,203	0,370	0,784	1,319	1,570
		4	72-91	-0,006	0,091	0,081	0,124	0,143	0,198	0,356	0,763	1,289	1,546
		5	95--114	-0,043	0,042	0,080	0,080	0,094	0,188	0,352	0,716	1,163	1,518
Interior	5--20	1	5--20	0,018	0,076	0,105	0,136	0,192	0,241	0,484	1,011	1,750	2,079
		2	28--43	0,079	0,101	0,085	0,131	0,161	0,216	0,439	0,973	1,676	2,029
		3	51--66	0,002	0,040	0,113	0,124	0,174	0,239	0,402	0,926	1,603	1,986
		4	74--89	-0,011	0,073	0,046	0,156	0,157	0,244	0,412	0,911	1,586	1,949
		5	97--112	0,015	0,126	0,136	0,123	0,209	0,250	0,441	0,925	1,487	1,955
Extensômetro				0,036	0,0702	0,1062	0,1386	0,1782	0,2322	0,4068	0,8973	1,5066	1,8603

Desvio Padrão nos Patamares										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ao Nível	0,02254	0,01957	0,01681	0,01789	0,00875	0,01250	0,00693	0,01566	0,02498	0,02203
Exterior	0,02890	0,01944	0,01301	0,01900	0,02447	0,02248	0,01205	0,03509	0,07037	0,04570
Interior	0,03100	0,02866	0,03038	0,01213	0,01933	0,01167	0,02869	0,03749	0,08857	0,04887

Anexo V – Extensões por via das *features*, ensaio P2

Coluna	Extensão (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,006	0,045	0,089	0,091	0,144	0,200	0,333	0,883	1,245	2,007
2	0,019	0,041	0,065	0,102	0,138	0,193	0,359	0,943	1,353	2,091
3	0,036	0,069	0,094	0,117	0,173	0,233	0,413	0,972	1,419	2,117
4	0,034	0,078	0,119	0,155	0,190	0,250	0,436	0,997	1,472	2,135
5	0,059	0,092	0,129	0,152	0,205	0,264	0,462	1,038	1,524	2,178
Extensómetro	0,036	0,070	0,106	0,139	0,178	0,232	0,407	0,897	1,507	1,860
Coluna	Erro Relativo (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	83,334	35,899	16,197	34,344	19,192	13,868	18,142	1,594	17,364	7,886
2	47,224	41,596	38,795	26,407	22,559	16,882	11,750	5,093	10,195	12,401
3	0,003	1,711	11,489	15,585	2,919	0,344	1,524	8,325	5,814	13,799
4	5,559	11,109	12,052	11,832	6,621	7,665	7,178	11,111	2,297	14,766
5	63,883	31,052	21,468	9,667	15,039	13,695	13,569	15,680	1,155	17,078
	Desvio Padrão nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0,01781	0,01944	0,02272	0,02594	0,02582	0,02762	0,04791	0,05215	0,09708	0,05687

Anexo VI – Extensões por via das miras, ao nível exterior e interior por via das miras, ensaio P3

				Extensão (%) nos Patamares									
	Linhas	Coluna	Miras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ao Nível	4-21	1	4-21	0,050	0,107	0,280	0,442	0,486	0,627	0,848	0,901	0,952	1,434
		2	26-43	0,025	0,096	0,239	0,440	0,451	0,614	0,538	0,920	0,933	1,440
Exterior	3-22	1	3-22	-0,002	0,077	0,221	0,422	0,462	0,586	0,823	0,893	0,918	1,388
		2	25-44	0,033	0,077	0,242	0,448	0,443	0,582	0,852	0,919	0,915	1,425
		3	47-66	0,046	0,101	0,239	0,473	0,458	0,619	0,892	0,959	0,989	1,557
		4	69-88	0,034	0,159	0,307	0,536	0,559	0,684	0,926	1,039	1,080	1,595
		5	91-110	0,035	0,094	0,288	0,467	0,503	0,680	0,883	0,999	1,036	1,545
		6	113-132	0,063	0,133	0,219	0,469	0,531	0,674	0,942	1,011	1,039	1,631
Interior	5-20	1	5-20	0,017	0,078	0,214	0,447	0,450	0,606	0,817	0,881	0,920	1,433
		2	27-42	0,037	0,079	0,230	0,411	0,448	0,593	0,833	0,911	0,915	1,438
		3	49-64	0,063	0,094	0,264	0,478	0,461	0,633	0,880	0,943	0,982	1,493
		4	71-86	0,053	0,076	0,225	0,458	0,463	0,597	0,867	1,015	1,054	1,566
		5	93-108	0,033	0,127	0,266	0,452	0,489	0,603	0,910	0,954	0,978	1,512
		6	115-130	0,134	0,110	0,270	0,487	0,518	0,668	0,922	1,044	1,073	1,642
Extensômetro				0,051	0,106	0,259	0,480	0,502	0,656	0,906	0,987	1,022	1,557

				Desvio Padrão nos Patamares									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ao Nível				0,01209	0,00517	0,02019	0,00125	0,01724	0,00666	0,15484	0,00957	0,00928	0,00328
Exterior				0,01961	0,02986	0,03349	0,03464	0,04210	0,04360	0,04068	0,05151	0,06223	0,08777
Interior				0,03772	0,01870	0,02224	0,02450	0,02475	0,02644	0,03793	0,05625	0,06022	0,07271

Anexo VII – Extensões por via das *features*, ensaio P3

Coluna	Extensão (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,038	0,102	0,230	0,451	0,484	0,624	0,885	0,973	0,997	1,576
2	0,051	0,116	0,243	0,467	0,482	0,615	0,872	0,960	1,006	1,554
3	0,040	0,089	0,218	0,409	0,429	0,566	0,777	0,856	0,890	1,371
4	0,040	0,104	0,244	0,450	0,478	0,613	0,846	0,926	0,970	1,475
5	0,043	0,104	0,244	0,447	0,467	0,592	0,837	0,910	0,952	1,440
6	0,045	0,105	0,240	0,437	0,458	0,585	0,816	0,888	0,921	1,401
Extensómetro	0,051	0,106	0,259	0,480	0,502	0,656	0,906	0,987	1,022	1,557
Coluna	Erro Relativo (%) nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25,922	3,952	11,264	5,982	3,623	4,892	2,350	1,448	2,484	1,220
2	0,579	9,231	6,249	2,647	4,022	6,264	3,784	2,765	1,604	0,193
3	22,023	16,193	15,894	14,738	14,575	13,732	14,267	13,299	12,950	11,946
4	22,023	2,069	5,863	6,191	4,818	6,569	6,653	6,209	5,125	5,267
5	16,175	2,069	5,863	6,816	7,009	9,769	7,646	7,829	6,886	7,514
6	12,276	1,127	7,406	8,901	8,801	10,836	9,963	10,057	9,918	10,019
Desvio padrão										
	0,004	0,008	0,010	0,018	0,019	0,020	0,036	0,040	0,041	0,075

Anexo VIII – Extensões por via das miras, ao nível, exterior e interior, ensaio P4

				Extensão (%) no Patamar								
	Linhas	Coluna	Miras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ao Nível	4--21	1	3--20	0,028	0,057	0,052	0,131	0,259	0,402	0,626	0,921	1,252
		2	24--41	0,038	0,098	0,092	0,138	0,252	0,417	0,639	0,939	1,316
Exterior	3--22	1	2--21	0,064	0,107	0,098	0,166	0,251	0,415	0,579	0,876	1,183
		2	23--42	0,059	0,127	0,106	0,153	0,255	0,434	0,594	0,875	1,200
		3	44--63	0,067	0,109	0,112	0,144	0,246	0,463	0,615	0,859	1,179
		4	65--84	0,042	0,065	0,066	0,106	0,239	0,369	0,557	0,875	1,192
		5	86--105	0,047	0,070	0,071	0,111	0,244	0,374	0,562	0,880	1,197
		6	107--126	0,060	0,040	0,048	0,142	0,197	0,443	0,616	0,950	1,193
Interior	5--20	1	4--19	0,068	0,116	0,127	0,160	0,310	0,475	0,732	1,043	1,460
		2	25--40	0,084	0,106	0,133	0,168	0,309	0,498	0,743	1,070	1,465
		3	46--61	0,046	0,087	0,128	0,167	0,246	0,471	0,716	1,089	1,472
		4	67--82	0,021	0,030	0,043	0,146	0,306	0,431	0,657	1,028	1,416
		5	88--103	-0,731	0,109	0,110	0,179	0,103	0,532	0,763	1,002	1,504
		6	109--124	0,017	0,108	0,018	0,083	0,190	0,469	0,676	1,084	1,532
Extensômetro				0,061	0,112	0,130	0,187	0,303	0,488	0,718	1,047	1,418

Desvio padrão nos Patamares									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ao Nível	0,41503	0,41568	0,41760	0,41787	0,42066	0,42964	0,44532	0,46449	0,47052
Exterior	0,00887	0,03010	0,02316	0,02159	0,01914	0,03463	0,02339	0,02926	0,00733
Interior	0,29096	0,02950	0,04537	0,03183	0,07658	0,03073	0,03719	0,03137	0,03610

Anexo IX – Extensões por via das *features*, ensaio P4

Coluna	Extensão (%) nos Patamares								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,052	0,105	0,110	0,182	0,301	0,505	0,799	1,176	1,581
2	0,050	0,101	0,112	0,179	0,295	0,494	0,788	1,159	1,570
3	0,054	0,106	0,100	0,170	0,295	0,477	0,762	1,117	1,510
4	0,059	0,112	0,109	0,177	0,299	0,482	0,762	1,110	1,505
5	0,055	0,102	0,103	0,178	0,277	0,453	0,717	1,066	1,457
6	0,046	0,097	0,094	0,160	0,273	0,446	0,691	1,034	1,437
Extensómetro	0,061	0,112	0,130	0,187	0,303	0,488	0,718	1,047	1,418
Coluna	Erro Relativo nos Patamares								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	15,031	5,913	15,123	2,777	0,758	3,526	11,251	12,353	11,464
2	18,299	9,497	13,580	4,380	2,736	1,271	9,719	10,729	10,688
3	11,763	5,017	22,839	9,188	2,736	2,214	6,099	6,716	6,458
4	3,593	0,359	15,894	5,448	1,417	1,189	6,099	6,048	6,105
5	10,129	8,601	20,524	4,914	8,671	7,134	0,167	1,844	2,721
6	24,835	13,082	27,469	14,529	9,990	8,569	3,787	1,213	1,311
	Desvio Padrão nos Patamares								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0,0041	0,0047	0,0063	0,0074	0,011	0,021	0,038	0,0492	0,0529